



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY**

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

**STANOVENÍ FUNKČNÍCH OBJEMŮ NÁDRŽE  
S UVAŽOVÁNÍM NEJISTOT VSTUPNÍCH DAT**

DETERMINATION OF THE FUNCTIONAL VOLUMES OF THE RESERVOIR CONSIDERING  
INPUT DATA UNCERTAINTIES

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. Stanislav Paseka

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. DANIEL MARTON, Ph.D.

**BRNO 2020**

## ABSTRAKT

Příčinou častějších výskytů hydrologických extrémů jsou nepříznivé změny a zásahy do vodního režimu v naší krajině způsobené především v minulém století spolu s nejistotami vyplývajících ze změny klimatu. V hydrologii je nejnaléhavějším problémem pokles dlouhodobých průměrných průtoků i pokles zdrojů podzemních vod, ale na druhou stranu nesmíme zapomínat ani na extrémní povodně. Je zřejmé, že metody a nástroje vedoucí k analýzám nejistot na funkčních prostorech v nádrži z pohledu zabezpečení a protipovodňové ochrany, jsou velmi důležité, užitečné a žádoucí.

Hlavním cílem je stanovit funkční objemy nádrže s ohledem na nejistoty z měření aplikovaných na vstupních datech. Dále je nutné nejistoty z měření na vstupních datech vyčíslit a také ukázat, jak tyto nejistoty zohlednit ve výsledcích.

Zásobní objem nádrže je stanoven z historické řady měsíčních průtoků, které jsou zatíženy nejistotami. Rovněž byly nejistoty z měření aplikovány na výparu vody z nádrže, průsaku tělesa hráze a na batygrafických křivkách nádrže. Pro stanovení optimálního zásobního objemu nádrže byl vytvořen simulačně-optimalizační model nádrže za použití zabezpečení podle trvání, který rozšíří stávající software UNCE\_RESERVOIR. Retenční objem nádrže je stanoven z nejistých povodňových vln získaných opakovaným generováním nejistoty na hydrogramu povodně. K tomu byl vyvinut software, který byl vytvořen na základě modifikované Klemešovy metody, která transformuje nejisté povodňové vlny. V obou softwarech jsou nejistoty z měření na vstupních datech zaváděny metodou Monte Carlo. Provázením těchto dvou softwarů byly komplexně stanoveny funkční objemy nádrže v podmínkách nejistot měření.

Případová studie je aplikována na reálných vodních nádržích v povodí řeky Moravy. Výsledkem bude zjištění, zda je přehrada vyhovující v současných podmínkách a také bude stanoven optimální návrh funkčních objemů nádrže za podmínek nejistot měření.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Zásobní objem nádrže, retenční objem nádrže, nejistota měření, metoda Monte Carlo, zabezpečení podle trvání, Klemešova metoda, transformace povodňové vlny, mřížková optimalizační metoda.

## **ABSTRACT**

Damaging changes and interventions in the water cycle in our landscape caused mainly in the last century together with uncertainties from climate change are the cause of more frequent occurrences of hydrological extremes. In Hydrology, the most urgent problem is that the values of the long-term mean flows are decreasing in rivers as well as the yield of groundwater sources, but on the other hand, we cannot forget to the problem of extreme floods. In these consequences developing methods and tools to uncertainty analysis of the reservoir yield and of the reservoir flood protection is very important, useful and desired.

The main aim was to determine the functional volumes of the reservoir considering input data measurement uncertainties and to quantify them and was explained how uncertainty took into account in results.

The active storage capacity was determined from the historical series of monthly flows that were affected by uncertainties, next were applied on water evaporation, seepage losses of the dam and morphological volume-area curves. The simulation-optimization reservoir model was developed and temporal reliability as reservoir yield performance measures was applied. This model will extend the existing UNCE\_RESERVOIR software. The flood capacity was determined from random flood wave variations were obtained by repeatedly generating uncertainty on the flood hydrograph. Software was developed based on the modified Klemes method, which was able to transform flood waves. The measurement uncertainties of data inputs were created using Monte Carlo method in both softwares. By connecting two softwares, the functional volumes of the reservoir under conditions of measurement uncertainties were complexly determined.

The case study was applied to the real water reservoir, in the Morava River Basin. The result will be whether the dam is resistant to the current conditions, or the optimal design of the functional volumes of reservoir under conditions uncertainties.

## **KEYWORDS**

Active Storage Capacity, Flood Storage Capacity, Uncertainty of Measurement, Monte Carlo Method, Temporal Reliability, Klemes method, Flood Wave Transformation, Grid Optimization Method.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Ing. Stanislav Paseka *Stanovení funkčních objemů nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat*. Brno, 2020. 136 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Školitel doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Stanovení funkčních objemů nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 7. 7. 2020

---

Ing. Stanislav Paseka  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli doc. Ing. Danielu Martonovi, Ph.D. za vypsání tématu disertační práce, pomoc v začátcích programování a za rady při zpracování disertační práce a také za společnou spolupráci v průběhu celého studia. Dále děkuji panu prof. Ing. Miloši Starému, CSc. za jeho důvěru a v neposlední řadě svojí rodině.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ.....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>METODIKA .....</b>	<b>12</b>
4.1	Nejistoty měření.....	12
4.1.1	Možné nejistoty vstupující do vodohospodářského řešení nádrže a jejich vyčíslení	16
4.1.2	Aplikování vstupních nejistot metodou Monte Carlo.....	22
4.2	Simulační modely nádrže.....	25
4.2.1	Stanovení zásobního prostoru nádrže pro zabezpečení 100 % .....	26
4.2.2	Stanovení zásobního prostoru nádrže pro zabezpečení menší než 100 % .....	27
4.2.3	Optimalizace .....	29
4.2.4	Zavedení ztráty vody z nádrže do vodohospodářského řešení zásobního objemu ..	29
4.2.5	Stanovení retenčního prostoru nádrže .....	30
4.3	Metody pro vyhodnocení .....	33
4.3.1	Střední hodnota.....	33
4.3.2	Rozptyl a směrodatná odchylka.....	34
4.3.3	Koeficient variace.....	34
4.3.4	Koeficient asymetrie.....	34
4.3.5	Kvantil .....	35
4.3.6	Čára pravděpodobnosti překročení .....	35
4.3.7	Transformační efekt.....	36
<b>5</b>	<b>VYVÍJENÝ SOFTWARE .....</b>	<b>37</b>
5.1	UNCE_RESERVOIR.....	37
5.1.1	Vstupy.....	37
5.1.2	Výpočet.....	41
5.1.3	Výsledky .....	45
5.2	TRANSFORM_WAVE .....	47
5.2.1	Vstupy.....	48
5.2.2	Výpočet.....	50
5.2.3	Výsledky .....	52

5.3	Propojení UNCE_RESERVOIR a TRANSFORM_WAVE.....	54
<b>6</b>	<b>PRAKTICKÁ APLIKACE .....</b>	<b>56</b>
6.1	Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení 100 % .....	59
6.2	Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení menší než 100 %.....	68
6.3	Retenční prostor nádrže.....	78
6.4	Komplexní řešení funkčních prostorů nádrže .....	97
<b>7</b>	<b>SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>108</b>
7.1	Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení 100 % .....	108
7.2	Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení menší než 100 %.....	110
7.3	Retenční prostor nádrže.....	112
7.4	Komplexní řešení funkčních prostorů nádrže .....	114
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>116</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>119</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>128</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>131</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>132</b>

# 1 ÚVOD

Aktuálně v celosvětovém měřítku velmi rychle narůstá nedostatek vody a ve stále větším počtu vznikají oblasti postižené suchem. V nejkritičtějších případech nastávají živelné katastrofy s masivními dopady. Pokud jde o sucho, tak v některých oblastech včetně střední Evropy dochází k razantnímu nárůstu jeho četnosti. Tento jev souvisí s procesem globální klimatické změny. Problémy se zabezpečením vodních zdrojů se začínají projevovat i v oblastech, kde si obyvatelstvo dosud ataky sucha příliš neuvědomovalo, ale začíná je už čím dál výrazněji pociťovat (Trnka a kol., 2017).

Podle aktuálních vyhodnocených dat o stavu počasí a podnebí ve světě Světovou meteorologickou organizací WMO (WMO, 2018), (WMO, 2019) a (WMO, 2020) pokračuje oteplování, které je pozorovatelné již několik desetiletí. V letech 2014, 2015 a 2016 bylo pravidlem, že na konci každého roku meteorologové vyhlásili daný rok za nejteplejší rok v historii měření. Rok 2016 byl ve světě prozatím nejteplejším rokem v historii měření. Rok 2018 byl ve světě 4. nejteplejším rokem, ale v Evropě a v ČR vůbec nejteplejším v historii. Poslední vyhodnocený rok 2019 byl druhým nejteplejším rokem v historii měření. Prvních 5 nejteplejších let ve světě se vyskytly v posledních 5 letech a 19 z 20 nejteplejších roků bylo naměřeno ve 21. století. Tyto údaje z WMO jsou počítány od doby moderních přístrojových měření za posledních cca 150 let.

V roce 2015 byla smluvními stranami Rámcové úmluvy OSN přijata úmluva o změně klimatu, tzv. Pařížská dohoda (Pařížská dohoda, 2015). Hlavním cílem dohody je z dlouhodobého hlediska přispět k udržení nárůstu průměrné globální teploty pod hranicí alespoň 2 °C a usilovat o udržení oteplení do 1,5 °C v porovnání s obdobím před průmyslovou revolucí

Dle tiskové zprávy Českého hydrometeorologického ústavu ČHMÚ bylo v České republice v roce 2019 nejteplejší léto za dobu pozorování od roku 1961 (Tisková zpráva ČHMÚ, 2019). V našem podnebí v průměru ovšem nezaznamenáváme snížení průměrného množství srážek, ale objevují se změny v rozložení srážek. Jinými slovy se prodlužují období výskytů sucha, které se střídají s kratšími, ale intenzivnějšími úhrny srážek, které mohou způsobovat lokální povodně. Voda rychle odtéká pryč a po několika dnech je situace obdobná, jako před srážkami. Kromě toho s rostoucí teplotou, kterou zažíváme poslední roky i na našem území, roste výpar. Suchá období se u nás ve větší míře začala objevovat přibližně od roku 2011 (Zahradníček a kol., 2014) a přetrvávají, ba se dokonce prohlubují dodnes. Výše zmíněné je dále potvrzeno zejména rozsáhlými regionálními povodněmi v letech 1997, 2002, 2009, 2010 a 2013, ale i výskyty přívalových povodní, se kterými jsme se potýkali a potýkáme v posledních letech.

Česká krajina prochází neustálým vývojem. Ve velkém měřítku byl ráz krajiny měněn především v druhé polovině minulého století. Za zmínku stojí například změny uspořádání krajiny, nárůst zastavěných ploch, stavby odvodňovacích zařízení a rozsáhlé komasace pozemků, změny v zemědělském hospodaření a další. Necitlivé zásahy do krajiny mají negativní vliv na její vodní režim. To celé v kombinaci s působením nejistot pramenících ze změny klimatického systému, které s sebou přináší zvýšené riziko v podobě extrémních povodní a výskytů dlouho trvajícího období sucha nebo také nejistot vznikajících z měření může ovlivnit data sledující pokles průtoků. Nejenom nejistoty změny klimatického systému, ale i nejistoty měření by měly být nedílnou součástí při odvození hydrologických veličin a je nezbytné s nimi uvažovat v současném vodohospodářském provozu, a také při sestavování výhledových hydrologických analýz.

V budoucnu je možný pokles průtoků zejména v málo vodných obdobích (Hanel a kol., 2011) a zvýší se pravděpodobnost výskytu nižších průtoků (Trnka a kol., Průvodce změnou klimatu), také se předpokládá, že hodnota dlouhodobého průměrného průtoku může klesnout k hodnotě 0,8 až 0,6  $Q_a$  (Kašpárek, 2005). Mimoto další výhled do následujících let s ohledem na četnosti a délky suchých období a výskytů přívalových srážek není příliš optimistický, a to ani v případě, kdyby se odhady z klimatických modelů plně nenaplnily. Navíc čím delší je období bez výskytu velkých regionálních povodní, tím se postupně zvyšuje pravděpodobnost, že tato událost nastane.

Obecně můžeme sucho klasifikovat na zemědělské sucho, hydrologické sucho, meteorologické a sociálně-ekonomické. V podobě zemědělského sucha dochází především ke snižování úrodnosti a výnosnosti zemědělské půdy. Dochází také k degradaci půdy vlivem větrné a vodní eroze. V lesnictví sucho a nedostatek vláhy ničí stromy a celé lesy, to s sebou přináší i kůrovcovou kalamitu. Nejvíce postižena suchem je borovice, která má kořenový systém do velkých hloubek. Tato destrukce potvrzuje, že půda vysychá do hloubky a hladina spodních vod je pod normálem. Druhým následkem je hydrologické sucho, které nás trápí v sektorech krajinného a vodního hospodářství, kdy pocítujeme hlavně pokles vydatnosti vodních zdrojů, a to jak povrchových, tak i podzemních vod. Kromě toho dochází i k zanášení vodních toků a nádrží. Při nízkých vodních stavech se snižuje kvalita vody v tocích i v nádržích, protože se tolik neředí vypuštěné odpadní vody. Tím dochází ještě k většímu kyslíkovému deficitu, což vede k lokálním ekologickým haváriím. Navíc za poslední 3 až 4 roky byl na několika oblastech České republiky zaznamenán výrazný srážkový deficit, tedy sucho meteorologické. V nejohroženějších oblastech ČR už nastalo i sociálně-ekonomické sucho, kde byl nedostatek pitné vody pro obyvatelstvo. Zaznamenaná sucha a povodně v posledních desetiletích způsobily a způsobují škody na majetku, ale také ohrožují životy obyvatel. Na našem území se zatím nejedná o masivní výpadky zásobování

vodou obyvatelstva a průmyslu, ale problémy jsou pociťovány především v sektorech zemědělství a lesnictví, kde se dopady klimatické změny projevují obvykle nejdříve. Výše zmíněné potvrzuje, že Česká republika není zcela připraveno na změnu klimatického systému. Z hlediska této nepříznivé tendence je nezbytné krajinu připravit tak, aby se dokázala vyrovnat s nepříznivými vlivy.

Úhrny srážek ve formě deště a sněhu jsou jediným zdrojem vody pro naši krajinu, protože z pohledu odtokových poměrů je Česká republika označována za střechu Evropy. Do České republiky tedy nepřitékají žádné významnější vodní toky, a proto zde musíme hospodařit s velmi omezenými vodními zdroji. V našich podmínkách se musíme zaměřit na zvyšování retenční schopnosti vody v krajině, ať už lepším hospodařením ze strany zemědělců a lesníků, navyšováním podílu organické hmoty v půdě, využitím všech vhodných dotačních titulů ze strany vlády, ale také technickými kroky. Mezi tyto kroky řadíme např. výstavbu a obnovu tůní, mokřadů nebo rybníků, kterých v naší krajině bylo před staletími mnohonásobně více. V neposlední řadě jsou vhodným řešením v boji proti změně klimatu jednoznačně vodní nádrže, ať už stávající nebo výstavba nových. Tyto stavby dokáží čelit oběma hydrologickým extrémům a zmírňovat jejich negativní dopady. Při povodních vodní nádrže účelně a viditelně transformují povodňové vlny, a naopak při probíhajících suchých obdobích byly vodní toky pod nádržemi výrazně dotovány akumulovanou vodou z nádrží s dostatečným zásobním prostorem a tím byl zajištěn minimální zůstatkový průtok. V případech, kdy hladina vody v nádrži klesne pod úroveň zásobního objemu, musí provozovatelé reagovat speciálními provozními manipulacemi. Takto tomu bylo podle (Viskot, 2019) např. od listopadu 2017 na vodní nádrži Vranov, kdy byly zaváděny mimořádné manipulace umožňující snížení odtoku na  $2,4 - 2,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a v zimních měsících dokonce na  $2,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Dle manipulačního řádu nádrže (Manipulační řád VD Vranov, 2011) by měl být odtok  $3,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Další speciální manipulace v povodí Moravy byly v minulých letech i na VD Vír, Hubenov, Znojmo a Nová Říše.

Vodní zdroje podzemních vod slouží převážně k zásobování obyvatelstva pitnou vodou. Tyto zdroje však nestačí k pokrytí všech potřeb odběrů pitné vody. Z tohoto důvodu jsou potřeby odběrů doplněny dodávkou surové vody z povrchových zdrojů v podobě vodárenských nádrží. Omezenost a zranitelnost vodních zdrojů, snížená vydatnost vlivem dlouhodobého sucha vedla již dříve vodohospodáře k ochraně území formou vytipování tzv. hájených lokalit akumulace povrchových vod. Tato hájená území by v budoucnu umožnila dalším generacím vybudovat nové vodní nádrže v morfologicky, hydrologicky a geologicky vhodných lokalitách (Tůma, 2017). Jedná se například o studie na hájených profilech Vlachovice, Skalička, Hanušovice a další. Jak již bylo zmíněno, tyto

stavby dokáží čelit oběma hydrologickým extrémům a vhodnými manipulacemi lze zmírňovat následky suchých a povodňových režimů.

Z říjnové tiskové zprávy z roku 2018 státního podniku Povodí Moravy, s.p. Vodní nádrže sehrály letos důležitou roli (Tisková zpráva PMO, 2018) byla naplněnost významných vodních nádrží v daném povodí velmi nízká. Konkrétně VD Letovice 31 %, VD Hubenov 39 %, VD Vír 41 % a VD Vranov 46 %. Srážky během prvních třech kvartálů v roce 2018 dosahovaly v povodí řeky Moravy pouze 64 % normálu a v povodí řeky Dyje 74 % normálu. Podle Brněnských vodáren a kanalizací, a. s. byl v listopadu roku 2018 na vodní nádrži Vír pokles hladiny nejkritičtější a klíčový zdroj pitné vody pro Brno z prameniště Březová nad Svitavou byl v roce 2018 na historickém minimu a jeho vydatnost klesala natolik, že nebylo možné zabezpečit dostatek pitné vody bez kombinace s povrchovými zdroji z VD Vír. Vodárny a kanalizace proto na základě nepříznivé situace a pesimistického výhledu na podzim roku 2018 nastartovaly adaptační program „SUCHO v BVK“ (Výroční zpráva 2018, BVK).

Když se neumíme vypořádat s poklesem podzemní vody, tak otázkou je, kdy nastane okamžik, že podzemní zdroje vody nebudou schopny dodávat vodu do stávajících systémů. Proč si tedy nezadržovat vodu zásobními objemy a zároveň nevytvářet retenční prostory pro eliminaci extrémních jevů v krajině výstavbou nových víceúčelových nádrží? Jak bylo řečeno, ruku v ruce s technickými opatřeními je ale nutné realizovat i přírodní opatření a zaměřit se na současné problémy komplexněji. Je také velmi důležité navázat na návrat k „tradičnímu“ hospodaření v krajině, které by nebylo motivováno pouze vidinou okamžitých nejvyšších zisků z 1 ha zemědělské nebo lesní půdy.

Témata typu změna klimatu, sucho a povodně jsou velmi často zmiňována mezi odborníky, politiky a v médiích. V reakci na popsání problémů začaly na podnět vlády vznikat strategické dokumenty. V roce 2015 byl připraven mezíresortní komisí VODA-SUCHO materiál s názvem Příprava realizace opatření pro zmírnění negativních dopadů sucha a nedostatku vody (VODA-SUCHO, 2015), který byl tentýž rok schválen vládou. V tomto materiálu je uvedeno mnoho opatření k naplnění cílů ochrany před negativními dopady sucha vždy s uvedenými gestory daného opatření a termínem plnění. Ve stejném roce vláda schválila také dokument Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR (MŽP – Strategie přizpůsobení, 2015). Tato strategie byla připravena Ministerstvem životního prostředí a představuje národní adaptační strategii ČR a také zhodnocuje pravděpodobné dopady změny klimatu včetně návrhů konkrétních adaptačních opatření. Obsažený výčet strategií v tomto dokumentu je velmi rozsáhlý a z pohledu projekce a vědy vyčerpávající. Mimo jiné je zde i bod 3.3.3.7 *Optimalizace funkce stávajících nádrží a vodohospodářských soustav*. Tento bod je klíčovým adaptačním opatřením ve vodním hospodářství a vede k lepší



připravenosti na oba hydrologické extrémny pomocí přehodnocení stávajícího využití vodních nádrží a vodohospodářských soustav. Dále vede k optimalizaci řízení nádrží tak, aby co nejlépe plnily funkci nově definovaných požadavků i s výhledem do budoucnosti. Za tímto účelem je doporučeno provádět simulační modelování a matematickou optimalizaci a výsledky zohlednit v úpravách manipulačních řádů vodních děl. V roce 2017 byl vládou schválen Národní akční plán adaptace na změnu klimatu (MŽP – Národní akční plán, 2015), který je implementačním dokumentem Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR. V tomto roce byla také vládou schválena Koncepce na ochranu před následky sucha pro území České republiky (MZE – Koncepce, 2017), jejímž hlavním cílem je vytvoření strategického rámce pro přijetí účinných legislativních, organizačních, technických a ekonomických opatření k minimalizaci dopadů sucha a nedostatku vody na životy a zdraví obyvatel, hospodářství, životní prostředí a na celkovou kvalitu života v ČR. Na situaci intenzivních výskytů hydrologických extrémů také zareagovaly státní podniky povodí, které zadaly ke zpracování Technicko-ekonomické studie nádrží ve vybraných profilech toků na celém území ČR, příkladem např. profil Hanušovice (Zadání Technicko-ekonomické studie PMO, 2015). V současnosti jsou tak na pěti hájených profilech prováděny přípravné projektové činnosti vedoucí k budoucí realizaci vodních děl. Všechny zmíněné dokumenty mají především za cíl vypořádat se a čelit problémům se suchem a povodněmi.

V ČR byly vodní nádrže vždy navrhovány podle historických hydrologických nebo odvozených hydrologických časových řad. Manipulační řády velkých vodních děl byly většinou schvalovány v době své výstavby a následně revidovány na dané hydrologické podmínky. Problémem je, že dříve užívaný přístup v malé míře nezohledňuje nejistoty vznikající v důsledku zpracování vstupních dat a nejistoty vznikající v důsledku možných budoucích hydrologických a klimatických změn. Dnes pozorujeme zvýšenou sociální poptávku, rostoucí potřeby v zemědělství a dlouhodobé poklesy vody v tocích zejména v letních měsících. Neurčitosti a nejistoty změny klimatu a nejistoty měření mohou vytvářet potenciální nejistotu, která by mohla ohrozit spolehlivost dodávek vody. Z pohledu adaptace je nezbytné navyšovat nebo přerozdělovat stávající prostory vody v nádržích, pokud to bude z kapacitních a technických důvodů možné. Jinými slovy je nutné provádět důkladné revize manipulačních řádů nádrží a novelizovat normu ČSN 75 2405 (ČSN 75 2405, 2017). Snažit se navyšovat zásobní objemy nádrží za účelem zajištění odběrů vody a eliminovat dopady sucha na toku pod nádržemi, zkapacitnit technické objekty a navyšovat retenční objemy nádrží pro bezpečné převádění povodní a účinné transformace povodňových vln. Je zřejmé, že téma pokročilého managementu a řízení povrchových vodních zdrojů je velmi aktuální a celosvětově se rozvíjí.

Negativním faktorem ovlivňujícím přesnost vodohospodářských výpočtů a také provoz nádrží v extrémních situacích je vodohospodářské řešení nádrže v podmínkách nejistot. Ať už nejistot vznikajících ze změn klimatu nebo z měření. V dnešní době je trendem ustupovat od deterministických řešení ke stochastickým, resp. pravděpodobnostním řešením. Proto výzkumy vedoucí ke zdokonalování návrhů a managementu nádrží v podmínkách nejistot, analýzy nejistot u plánovaných nebo přerozdělení stávajících prostorů vody u nádrží jsou v této době velmi žádané a důležité. Tato práce se zabývá stanovením funkčních objemů nádrže v podmínkách nejistot, konkrétně nejistot z měření na datech vstupujících do vodohospodářského řešení nádrže.

## 2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Celkový koncept nejistoty může být v současné době vnímán z více hledisek a uplatnění nejistot je celá řada. Nejistotu lze klasifikovat podle (Kiureghiana a Ditlevsen, 2009) do dvou kategorií, konkrétně jako nejistotu z anglického aleatoric uncertainty a jako neurčitost z anglického epistemic nebo také knowledge based uncertainty, jak bylo popsáno v (Marton, 2018). V úvodu bylo zmíněno, že nejistoty mohou pramenit jednak z vlivu budoucí změny klimatického systému nebo z měření. Nejistoty měření spadají do skupiny nejistot tzv. aleatoric uncertainty. Tato kategorie nejistot je vázána k určitému rozdělení pravděpodobnosti a zobrazuje variabilitu spojenou se systémem nebo prostředím. Tuto nejistotu lze popsat pomocí stochastických simulací (Dantan a kol., 2013). Nejistoty z budoucí změny klimatu lze chápat jako nejistotu vznikající při modelování odhadu budoucích vývoje emisních koncentrací skleníkových plynů neboli emisních scénářů. Tento druh nejistoty je chápán jako tzv. hluboká nejistota z anglického deep uncertainty a byla aplikována v habilitační práci (Marton, 2018). Pohled na typologii nejistoty a neurčitosti je v technických úlohách složitý a může ji určit sám autor při tvorbě modelu na základě mnoha faktorů, znalostí, procesu rozhodování a dalších (Kiureghian a Ditlevsen, 2009).

V současné praxi se v Česku při vodohospodářských výpočtech s nejistotami změn klimatu nebo s nejistotami měření příliš nesetkáváme. Nejistoty jsou nanejvýš uvažovány velmi zjednodušeně například empirickým zavedením minimálních a maximálních mezí, které jsou pouhým odhadem vycházejícího ze zkušeností s daným problémem nebo pomocí zavedení koeficientů, jako např. v (Duchan a Říha, 2015), kde nejistoty byly vyjádřeny pomocí koeficientů spolehlivosti. Zohlednění nejistot vyvolaných změnou klimatu nebo z měření však může výsledky ovlivňovat, protože při řešení deterministickou metodou nastávají značné ztráty přesnosti na úkor jednoduchosti řešení.

Samotné nejistoty z pohledu současného poznání byly nejprve popsány v práci Risk, uncertainty, and Profit (Knight, 1921). Nejistoty měření v podobě, jaké známe dnes se do běžné praxe kalibračních laboratoří dostaly až v roce 1990 vydáním dokumentu WECC 19/90 Západoevropským kalibračním sdružením (WECC, 1990), ve kterém byly poprvé nastíněny obecné principy nejistoty a definovány další postupy k zavedení teorie nejistoty do metrologické praxe. Po něm následovaly další předpisy, jako Směrnice pro vyjadřování nejistoty při měření (Guide to the Expression of Uncertainty, 1993), kde byla položena základní definice a teorie nejistoty měření, dále Metodika vyjadřování nejistot při kalibracích (Expression of Uncertainty, 1997) nebo rozšiřující dokument (ISO GUM, 2004), který se věnuje distribuci a propagaci nejistot měření využitím simulace Monte Carlo. Vstupem České republiky do Evropské unie bylo nutné dodržet zmíněné dokumenty, které

definovaly zcela nový pohled na do té doby u nás zažitý pojem chyby vzniklé měřením. Základem bylo nahrazení názvosloví novým pojmem nejistoty měření. Z dokumentů byly sestaveny národní předpisy a normy, které jsou pro ČR závazné. Český překlad má název Stanovení nejistot při měřeních (TPM 0051, 1993).

Odhad nejistoty v podobě nejistých a neúplných dat nebo neznalosti systémů v hydrologii byly nejprve popsány metodou GLUE (Beven and Binley, 1992). V zahraničí dále následovalo mnoho publikací, které se touto danou problematikou zabývaly, za zmínku stojí práce (Beven, 2007), kde je mimo jiné popsáno, jak nejlépe prezentovat nejisté predikce uživatelům a rozhodujícím činitelům, kteří s výsledky nebo predikcemi ovlivněnými nejistotami dále nakládají. Výzkumů, které se zabývají přímo nejistotami při měření nebo nejistotami při předpovědi obecně v hydrologii, možným vlivem těchto nejistot na jednotlivé prostory vody v nádržích či vlivem nejistých scénářů změn klimatu na komplexní řešení rozsáhlých systémů vodních zdrojů je mnoho a jsou z celého světa.

Nejistoty měření samotných průtoků nebo možné přístupy k doplnění chybějících průtokových řad byly zkoumány v (Baldassarre a Montanari, 2009), (Shrestha a Simonovic, 2010), (Tomkins, 2014), (Westerberg a McMillan, 2015) a (Westerberg a McMillan, 2016). Dále nejistoty konkrétně metodou Monte Carlo byly aplikovány pro předpovídání proudění vody v toku v (Whitehead a kol., 2009) nebo v (Gholam a kol., 2012) byla prováděna analýza nejistot v předpovídání povodní.

Hydrologické aplikace zahrnující propagaci nejistot do hydrologických vstupů při měření srážek, přítoků vody do nádrže a výparu na vodní bilanci nádrží byly testovány v práci (Winter, 1981) nebo později v (LaBaugh a Winter, 1984) byly taktéž zkoumány vlivy hydrologických nejistot pramenící z měření na objem i chemickou analýzu vody v nádrži. Novější publikace zkoumající rizika a vliv nejistoty na zásobní objem nádrže s využitím Monte Carlo simulace se zabývají v (Campos a kol., 2014) nebo v (Kuria a Vogel, 2014), kde byla provedena analýza nejistot zásobního objemu nádrže s využitím Water Supply Yield Model. Na základě nejistých budoucích povodňových přítoků vody do nádrže byla v (Li a kol., 2016) provedena analýza pravděpodobnostních rizik nádrže nebo v (Chen a kol., 2018) analýza rizik protipovodňové kontroly s nejistou prognózou přítoků vody simulací Monte Carlo v soustavě nádrží.

Řešení současně zásobního a retenčního prostoru v nádrži v podmínkách nejistot bylo zkoumáno v článku (Ngo a kol., 2007), kde byla použita optimalizace komplexní evolucí na největší víceúčelové vodní nádrži ve Vietnamu pomocí simulačního modelu MIKE 11. V tomto případě optimalizace soustředí pozornost na kompromis mezi povodňovou regulací a vodní elektrárnou v povodňové sezóně. Výsledky ukazují, že lze nalézt optimalizovanou regulaci, která snižuje povodňové špičky a zároveň udržuje vysokou úroveň vodní hladiny

pro výrobu vodní energie. Dalším článkem, který hodnotí nový přístup rozhodovacích metod pro navrhování nových víceúčelových nádrží je (Paseka, Kapelan, Marton, 2018). Použité metody, kterými jsou teorie rozhodování, metoda odolnosti a robustnosti, byly ve zmíněném článku vybrány především pro analýzu různých konstrukčních parametrů nové přehrady, zejména různých výšek přehrad vedoucích k různým objemům nádrží. Studie představuje nový přístup k optimálnímu návrhu víceúčelové nádrže, která by zajistila dostatek vody v toku, zásobování pitné vody pro obyvatelstvo a průmysl, zásobování vody pro zemědělské využití a také pro výrobu vodní energie v současných podmínkách nejistoty klimatu. Nejistoty jsou interpretovány jako možné budoucí změny v klimatickém systému s využitím výstupů z regionálních klimatických modelů. Byl vyvinut simulační model, který je schopen stanovit dlouhodobou vodní bilanci a využívat tato data pro kvantifikaci odolnosti a robustnosti s ohledem na zásobování vodou. Simulační model byl propojen s programem GANetXL, aby bylo možné provádět optimalizaci provozu vodní nádrže s využitím genetických algoritmů. Simulačně-optimalizační model byl poté aplikován na případovou studii v Česku v povodí řeky Moravy v chráněném profilu Hanušovice, kde je v budoucnu plánována výstavba nové víceúčelové přehrady. Získané výsledky byly podrobně analyzovány s cílem identifikovat optimální řešení výšky přehrad s maximálními ekonomickými výnosy a co nejnižšími náklady za pomoci nových provozních pravidel analyzované víceúčelové nádrže.

Dnešním trendem ve světě je komplexní řešení rozsáhlých propojených systémů vodních zdrojů s náklady na rekonstrukce nebo výstavbu nových vodních zdrojů. K tomu slouží optimalizační metody s odhadovanými scénáři budoucí poptávky vody a scénáři změny klimatu jako v (Anand a kol., 2011), (Boano a kol., 2015), (Maiolo a kol., 2017), (Roach a kol., 2017) nebo (Kapelán a kol., 2017).

V ČR se první zmínky o vlivu nahodilých chyb výchozích hydrologických podkladů na hodnotu zásobního objemu nádrže poprvé objevují na území tehdy ještě ČSSR ve zprávě o výsledcích řešení při spolupráci na normalizačním rozborovém úkolu z roku 1984 (Starý, 1984). V rámci tohoto výzkumného záměru zadaného podnikem Hydroprojekt byl definován princip zavedení nejistot, resp. nahodilých chyb do časových řad za použití metody Monte Carlo a jejich následné zavedení do výpočtů zásobního objemu nádrže. Další publikací vycházející z této zprávy byl článek *The Influence of Uncertainties in the Calculation of Mean Monthly Discharges On Reservoir Storage* (Marton a kol., 2011), který ukázal, že nejistoty vstupních hydrologických podkladů mohou negativně ovlivnit neboli podhodnotit velikost zásobního objemu nádrže a reálně způsobit i neočekávaný provozní výpadek nádrže a způsobit tak vysoké ekonomické škody.

V současné době se ale v Česku s nejistotami měření do vodohospodářských výpočtů neuvažuje a nejsou známy ani konkrétní velikosti nejistot vstupních dat. Dokonce ani nejistoty průtokových řad nejsou v běžné praxi detailněji zohledňovány a není přesně známý jejich dopad. V rámci bakalářské práce (Paseka, 2014) byly na jednom zkoumaném profilu nad nádrží stanoveny velikosti rozšířených nejistot měsíčních průtoků v řádech jednotek procent.

Z výzkumu na Ústavu vodního hospodářství krajiny, Fakulty stavební, VUT v Brně, viz články (Marton, 2012), (Marton a kol., 2015 (a),(b),(c)), (Paseka a Marton, 2015), (Paseka, 2016), (Marton a kol., 2016), (Paseka a kol., 2016) a (Marton a Paseka, 2017) bylo potvrzeno, že vstupní velikosti mají vliv na velikosti zásobního prostoru, ale i na výslednou zabezpečenost nalepšeného odtoku. Hodnoty zabezpečeností určené bez uvažování nejistot vstupních dat mohou být výrazně podhodnoceny a za určitých podmínek mohou být nádrže a jejich zásobní objemy dokonce mylně zařazeny do tříd významnosti vodních děl pro účely zásobování vodou. Dosavadní výsledky ukázaly, že nejistoty mohou negativně ovlivnit provoz nádrže v průběhu málo vodných období či v obdobích výskytu sucha. Dále se ukázalo, že přítok vody do nádrže je nejvýznamnějším zdrojem nejistot, po něm následovala batygrafie, nakonec výpar a průsak.

Vodní nádrže ovšem hrají stále velmi důležitější úlohu v řízení vodních zdrojů. Provozování víceúčelových nádrží je složité kvůli konfliktu mezi různými cíli. Tyto nádrže v optimálním návrhu a provozu mohou zefektivnit hospodaření s vodou. Otázkou tedy zůstává, jak se vypořádat nejen s návrhem nových, ale především se stávajícími víceúčelovými nádržemi, které v posledních letech nedokáží zcela úplně reagovat na současné podmínky. Řešením může být nalezení vhodného poměru mezi velikostí zásobního a retenčního prostoru vody v nádrži v podmínkách nejistot. Oba tyto prostory je žádoucí maximalizovat. U stávajících nádrží také lze např. navýšit těleso hráze, toto opatření ale nemusí být vždy proveditelné a zároveň je velmi nákladné. Dále můžeme nově navrhnout a zkapacitnit spodní výpusti a bezpečnostní přeliv. Ještě dražší alternativou může být výstavba další nádrže se zásobní nebo retenční funkcí v blízkosti stávající nádrže.

### 3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Z názvu disertační práce plyne, že jsou objemy nádrže řešeny v podmínkách nejistot, konkrétně v podmínkách nejistot měření vznikajících na vstupních datech. Záměrem tedy je co nejpřesněji popsat a odhadnout hodnoty příslušných nejistot měření. Zavedením těchto nejistot do uvažovaných vstupů vodohospodářského řešení nádrže je i obdržený výsledek vodohospodářského řešení nádrže zatížený nejistotami. Je tedy velmi důležité, jak výsledky zatížené nejistotami vyhodnotit, vhodně uchopit a interpretovat.

Prvním cílem disertační práce je k vyvinutému softwaru UNCE\_RESERVOIR (Marton a kol., 2015d) vytvořit uživatelské rozhraní pro snazší práci s tímto softwarem. Dále tímto softwarem na základě výpočtů a testování na několika profilech vodních nádrží obecně odhadnout potenciální nejistotu zásobního objemu nádrží. Zmiňovaný program umí zavádět ztráty vody z nádrže a také zavádět nejistoty pomocí metody Monte Carlo do vstupních hydrologických, morfologických a provozních dat potřebných pro vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže pro 100 % zabezpečení.

Druhým cílem je software UNCE\_RESERVOIR rozšířit o výpočet, který bude počítat optimální zásobní objem nádrže pro zabezpečení menší než 100 % v podmínkách nejistot. Poté tento simulačně optimalizační model otestovat, zanalyzovat a vyhodnotit výsledky v podmínkách nejistot na reálných datech vybraných vodních nádrží.

Třetím cílem je vyvinout zcela nový software pro transformaci povodňových vln modifikováním grafické Klemešovy metody. Dále naprogramovat do softwaru opět zavádění vstupní nejistoty metodou Monte Carlo. Tento software poté umožní stanovit retenční objem nádrže v podmínkách nejistot vstupních dat. Poté bude cílem na základě výpočtů a testování na reálné vodní nádrži vhodně vyhodnotit velikost retenčního objemu nádrže v podmínkách nejistot.

Posledním cílem je komplexně stanovit funkční objemy nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat na vybrané reálné vodní nádrži. Úkolem bude provázat 2 výše zmíněné softwary pro výpočet zásobního objemu nádrže a pro výpočet retenčního objemu nádrže a v závislosti na sobě stanovit vhodný návrh objemů vody v nádrži v podmínkách nejistot měření. Pouze provázanost obou softwarů zaručí komplexní výpočet. Dále vhodně výsledky vyhodnotit a interpretovat. Závěrem doporučit vlastníkům a uživatelům nádrží konkrétní hodnoty funkčních objemů analyzovaného vodního díla při řešení na aktualizovaných datech a v podmínkách nejistot měření. Takto komplexní řešení nádrže v podmínkách nejistot měření přispěje k redukci nebezpečí vzniku nedostatku vody při provozu vodních nádrží v průběhu málo vodních období, ale zároveň s dostatečně bezpečným návrhem při výskytu opačných extrémů v podobě povodní.

## 4 METODIKA

V kapitole Metodika jsou nejprve popsány nejistoty měření a podrobně definovány typy nejistot a jejich stanovení. Následně jsou rozebrány veličiny vstupující do vodohospodářského řešení nádrže a jejich možné chyby při stanovení. Těmito vstupy jsou především přítok vody do nádrže (reálná průtoková řada pro zásobní objem nádrže a povodňová vlna pro retenční objem nádrže), dále batygrafické křivky nádrže, výpar z vodní hladiny, průsak tělesem hráze, průsak podloží a ostatní. Dále je popsána aplikace nejistot do vodohospodářského řešení metodou Monte Carlo pro 1D a 2D souřadnicový systém.

Následuje popis simulačních modelů nádrže, kde jsou popsány jednotlivé typy úloh vodohospodářského řešení zásobního a retenčního prostoru nádrže. Tato kapitola je dále dělena do částí Stanovení zásobního prostoru nádrže pro zabezpečení 100 % a Stanovení zásobního prostoru nádrže pro zabezpečení menší než 100 %. Dále následuje popis optimalizace, kde je podrobněji popsána optimalizační mřížková metoda, která byla v této práci použita. Následuje podkapitola Zavedení ztráty vody z nádrže do vodohospodářského řešení zásobního objemu a Stanovení retenčního prostoru nádrže, kde je detailněji popsána grafická Klemešova metoda.

Nakonec jsou uvedeny Metody pro vyhodnocení.

### 4.1 Nejistoty měření

Samotné měření a technologie jsou během svého vývoje modernizovány a zdokonalovány, což vede ke snižování chyb měření. Velikosti chyb měření se odvíjí od dvou faktorů ovlivňujících měřicí proces. Prvním faktorem je samotná metoda měření, do které se řadí měřicí zařízení (např. citlivost hodnot měřené veličiny, přesnost, složitost obsluhy, poruchovost) a postup měření (souhrn postupů, pravidel a podmínek předepsaných pro danou metodu měření dle návodu či předpisu). Druhý faktor je tvořen podmínkami při měření. Těmito podmínkami je chápán vliv měřicího zařízení (např. celkový stav přístroje, zařízení, kvalita údržby, seřízení, kalibrace, nastavení), vliv prostředí (např. změna tlaku, vlhkosti, různá záření, odrazy signálů, znečištění vody) a vliv lidského faktoru (Böhm a kol., 1990).

Při jakémkoliv měření je v první řadě velmi důležité detailně rozumět postupům. Znat základní principy a funkce měřicího přístroje, ale především je důležitá znalost metody měření. To umožní vhodně vyhodnotit potenciální vlivy, které mohou působit v průběhu měření jako zdroje nejistot a ovlivnit výsledek.



V teorii nejistot měření klasifikujeme tzv. nejistotu typu A a nejistotu typu B. Tato klasifikace je určena na základě způsobu získání dané nejistoty. Z matematické statistiky byla jako míra standardní nejistoty zvolena směrodatná odchylka příslušného rozdělení pravděpodobnosti pro jednotlivé zdroje nejistot. Rozdíl mezi nejistotami typu A a typu B je dán způsobem, jakým je směrodatná odchylka získána (Palstat s.r.o., 2002).

Nejistota typu A, která je značena jako  $u_A$ , se stanovuje výpočtem z opakovaně provedených měření dané veličiny. Vychází tedy ze statistického zpracování opakovaného měření, při kterém se nemění měřená veličina ani ovlivňující podmínky. Míra standardní nejistoty typu A se vyjadřuje jako směrodatná odchylka výběrových průměrů, kterému odpovídá vztah (1)

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

kde

$n$  je počet měření dané veličiny,

$i$  je  $i$ -tá hodnota měřené veličiny,

$x_i$  je  $i$ -tý opakovaný výběr (opakované měření),

$\bar{x}$  je výběrový průměr neboli střední hodnota stanovená podle vztahu (2)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

Pro platnost tohoto stavu se očekává alespoň 10 měření, jinak je výsledná nejistota měření korigována opravnými koeficienty dle počtu měření  $n$ , které zohlední malý počet opakování měření.

Na rozdíl od nejistoty typu A se nejistoty typu B stanovují jinak než opakovaným měřením a nejsou založeny na statistických přístupech. Rozdíl mezi typem nejistoty A a typem nejistoty B je zřejmý, ale problémem je, jak tedy nejistoty typu B stanovit. Nejprve je nutné najít a stanovit nebo případně odhadnout všechny možné zdroje nejistot (Palstat s.r.o., 2002).

Možné zdroje nejistot typu B (Starý, 2005a):

- *Vlivy vázané na použité přístroje, etalony a vybavení*

Do této skupiny lze zařadit například vliv nejistoty kalibrace nebo ověření, stabilita a dynamické chyby přístrojů, vnitřní tření v přístrojích, rozlišení odečtu z přístrojů a další.

- *Vlivy okolního prostředí a jejich změny*

Zde se jedná zejména o tlak, případně změnu tlaku, relativní vlhkost, magnetické a elektrické pole, hustota vzduchu, ovzduší, prašnost a další.

- *Vliv metody*

V této skupině jde o vliv interakce s měřeným předmětem, použití konstant, vlivy reálných parametrů oproti ideálním, odvod či přestup tepla, ztráty a další.

- *Vliv operátora*

Jedná se především o nedodržení metodik, elektrostatické pole, tepelné vyzařování, osobní zvyklosti a další.

- *Ostatní vlivy*

Mezi ostatní vlivy se zahrnují náhodné omyly při odečtech a zápisu hodnot, těžko postihnuteľné globální vlivy jako vlivy ročních období, denní doby a podobně.

Při určování standardní nejistoty typu B se vytipují všechny možné zdroje nejistot z jednotlivých zdrojů  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  a určí se standardní nejistoty typu B značeny jako  $u_{BZj}$ . Poté se odhadne maximální rozsah změn  $\Delta z_{jmax}$  a to tak, že se volí taková hodnota, aby její překročení bylo málo pravděpodobné. Standardní nejistota  $u_{BZj}$  se potom určí podle vztahu (3)

$$u_{BZj} = \frac{Z_{jmax}}{\chi} \quad (3)$$

kde

$\Delta z_{jmax}$  je maximální odchylka  $j$ -tého zdroje nejistoty,

$\chi$  je konstanta, která plyne z rozdělení pravděpodobnosti, kterým se daný zdroj řídí.

Konstanta  $\chi$  udává poměr maximální hodnoty  $\Delta z_{jmax}$  ku směrodatné odchylce normálního rozdělení. Pro normální rozdělení tato konstanta  $\chi$  odpovídá hodnotě 3.

Celková standardní nejistota typu B, která je značena jako  $u_B$ , se určí pro  $n$  odpovídající počet zdrojů nejistoty  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  geometrickým průměrem nejistot jednotlivých zdrojů podle vztahu (4)

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{BZj}^2} \quad (4)$$

Následně je standardní nejistota typu B převedena do podoby, která má opět charakter směrodatné odchylky (Palenčár a kol., 2001a).

V případě kombinace nejistot typu A a typu B se zavádí tzv. kombinovaná standardní nejistota  $u$ , která je dána geometrickým průměrem standardní nejistoty typu A  $u_A$  a standardní nejistoty typu B  $u_B$ , jak je uvedeno ve vztahu (5)

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (5)$$

Výše popsaným postupem se získává standardní kombinovaná nejistota  $u$ . Slovo standardní se používá z důvodu toho, že pro stanovení byly použity hodnoty směrodatných odchylek. Kombinovaná standardní nejistota je určena vždy s určitou pravděpodobností. Například pro normální rozdělení je určena s pravděpodobností přibližně 68 %, což odpovídá koeficientu rozšíření  $k = 1$ . To znamená, že přibližně 1/3 výsledků může spadat mimo takto stanovené pole nejistot. Takováto situace je pro drtivou většinu případů v praxi nepřijatelná, a proto se přistupuje k vynásobení standardní nejistoty koeficientem rozšíření  $k$ , kterým dosáhneme pokrytí možných výsledků s vyšší pravděpodobností, jak je uvedeno ve vztahu (6). Jinými slovy se zavádí rozšířená standardní nejistota, která umožní získat pokrytí možných výsledků s vyšší pravděpodobností. Pro normální rozdělení se používají základní koeficienty rozšíření, a to koeficient rozšíření  $k = 2,0$ ;  $k = 2,58$  a  $k = 3,0$  pro pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, 99 % a 99,7 %. V praxi se nejvíce uplatnil koeficient  $k = 2,0$  (Palstat s.r.o., 2002).

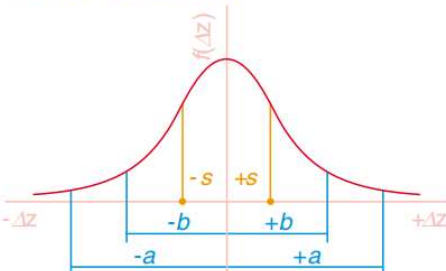
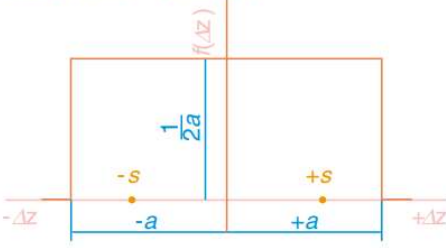
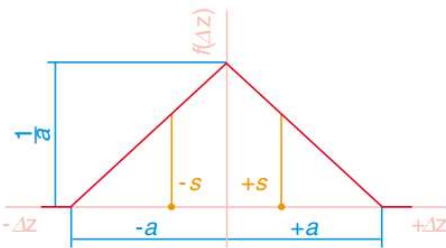
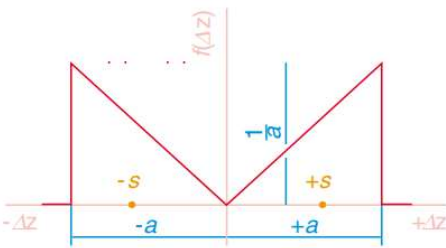
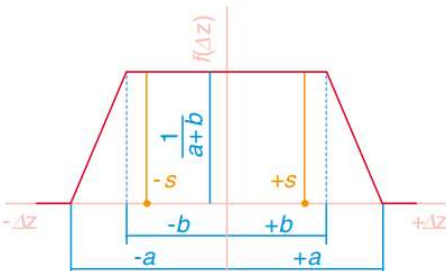
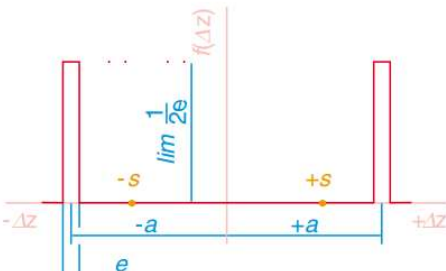
$$U = u \cdot k \quad (6)$$

kde

$k$  je koeficient rozšíření a jeho hodnota obecně záleží na použitém rozdělení pravděpodobnosti.

Aproximace normálním rozdělením se používá tehdy, když se častěji vyskytují malé odchylky od jmenovité hodnoty, zatímco s rostoucí velikostí odchylek pravděpodobnost jejich výskytu klesá. Typickým příkladem je zdroj nejistoty z měřicího přístroje od spolehlivého výrobce, u kterého se předpokládá, že většina přístrojů bude zdrojem pouze malých chyb (Palenčár a kol., 2001b).

Na Obr. 1 je ukázka základních průběhů nejčastěji používaných pravděpodobnostních rozdělení včetně vyznačených odchylek  $\Delta z$  a odpovídajících koeficientů  $k$ .

Rozdělení	$z_{\max}$	$k$	Rozdělení	$z_{\max}$	$k$
normální (Gaussovo) 	$a$	3	rovnoměrné - pravoúhlé 	$a$	$\sqrt{3}$ -1,73
trojúhelníkové (Simpsonovo) 	$a$	$\sqrt{6}$ -2,45	bimodální (trojúhelníkové) 	$a$	$\sqrt{2}$ -1,41
lichoběžníkové 	$a$	2,32 při $b = \frac{a}{3}$	bimodální (Diracovo) 	$a$	1
	$a$	-2,19 při $b = \frac{a}{2}$			
	$a$	2,04 při $b = \frac{2a}{3}$			

**Obr. 1** Rozdělení pravděpodobnosti a koeficienty  $k$  (Palenčár a kol., 2001b)

#### POZNÁMKA:

Dalšími rozděleními používanými v hydrologii jsou např. Normální Laplace – Gaussovo rozdělení, Johnsonovo rozdělení (logaritmicko-normální) nebo Pearson III.

#### 4.1.1 Možné nejistoty vstupující do vodohospodářského řešení nádrže a jejich vyčíslení

Nejdůležitějším podkladem pro samotné vodohospodářské řešení je přítok vody do nádrže. V případě řešení zásobní funkce nádrže se v tomto případě jedná o reálnou průtokovou řadu odvozenou z měření s voleným časovým krokem. Pro řešení retenční funkce nádrže se pak jedná o měřenou nebo odvozenou povodňovou vlnu s voleným časovým krokem v řádu minut až hodin. Oba tyto podklady při vodohospodářském řešení jsou bezesporu zatíženy nemalými vstupními nejistotami, ať už ze samotného měření průtoků nebo při odvozování průtokových řad a povodňových vln. Dalším neméně důležitým podkladem jsou

batygrafické křivky nádrže, které jsou základními charakteristikami nádrže a symbolizují morfologii daného údolí.

Do vodohospodářského řešení zásobní funkce nádrže je v dnešní době nezbytné zavádět ztráty vody z nádrže. Do ztrátových činitelů nádrže řadíme ztráty vody výparem z vodní hladiny, průsakem tělesa hráze a podloží, ztráty vznikající netěsnostmi uzávěru a namrzáním. Obdobně jsou i ztráty vody z nádrže zatíženy patřičnými nejistotami.

V následujících podkapitolách jsou odhadnuty možné velikosti uvedených vstupujících dat do vodohospodářského řešení nádrže. Vždy je ovšem velmi nutné dodržovat předem dané podmínky a předpisy, navíc ale výsledky můžou být ovlivněny lidským faktorem.

- Přítok vody do nádrže

Přítok vody do nádrže neboli stanovení reálné průtokové řady pro určení zásobního objemu nádrže vychází z měření na příslušném vodoměrném profilu, pokud možno co nejbližší k přítoku vody do samotné nádrže. V běžné praxi se členy reálných průtokových řad udávají jako průměrné hodnoty „spojitě“ naměřených průtoků, a to jako hodnoty průměrných hodinových, denních, měsíčních nebo ročních průtoků.

Na důležitých profilech toků, a právě na přítocích do nádrží jsou zřízeny vodoměrné stanice, které ČHMÚ nebo správci povodí vybavují nejmodernější technikou. Především tlakovými sondami, případně ultrazvukovými nebo bublinkovými přístroji. Tlakové sondy dnes dokážou měřit i ve velmi znečištěné vodě. Dosažené měření je velmi přesné například v porovnání s plovákovým zápisem nebo při odečtech z vodočetné latě. Snad jedinou nevýhodou této moderní techniky může být výpadek při nedodávce elektrické energie ze sítě, ale v dnešní době už je tento problém doplněn nebo nahrazen jiným vhodným zdrojem pro výrobu elektrické energie.

V České republice jsou nyní velmi používané tlakové sondy, kterými jsou vybaveny vodoměrné stanice podniků povodí, ČHMÚ nebo pro potřeby výzkumných ústavů. Přesnost měření tlakových sond je např. podle výrobce Fiedler uváděna pro horní mez rozsahu dle mezinárodní normy (IEC 60770, 2010). Velikost standardní nejistoty měření výšky hladiny lze uvažovat do  $\pm 0,50 \%$ , tato hodnota pokrývá přesnosti tlakových sond.

Ovšem pravidelným měřením tlakovými sondami získáme pouze hodnotu vodního stavu. K převedení vodního stavu na hodnotu průtoku je zapotřebí měrná křivka průtoků koryta toku. Pro konstrukci měrné křivky potřebujeme mít naměřený vhodný vzorek tzv.  $Qh$  bodů v měrném profilu. Každý  $Qh$  bod měrné křivky průtoků je získán pomocí měření vodního stavu a odpovídajícího rychlostního pole v měrném profilu a jeho následného vyhodnocení do průměrného profilového průtoků  $Q$ . Poté se množinou naměřených  $Qh$  bodů prokládají

různé typy regresních křivek pro získání empirických měrných křivek, ty tedy udávají závislost mezi vodními stavy a průtoky, které jsou funkcí výšky (Starý, 2005a).

Přesnost odvození průtokové řady je tedy ovlivněna mnoha vlivy nejen při samotném měření výšky vodního stavu, ale také převedením vodního stavu na průtok. Ztráta přesnosti může být zapříčiněna volbou regresních rovnic, nejistotou při hydrometrickém měření, aktualizací měrných křivek, protože v čase dochází ke změnám tvaru průtokového koryta vlivem zanášení, vymílání a zarůstání profilů a dalších vlivů. Měrné křivky jsou časově omezené a platí pouze pro určité období. Jejich tvar se musí neustále upřesňovat opakovaným měřením. V profilech s velkým vlivem stavu vegetace (zarůstáním) se mohou užívat dvě měrné křivky pro letní a zimní období. Tím se dají možné nejistoty eliminovat. Naopak v extrémech jako jsou velmi nízké nebo naopak vysoké stavy nejistoty narůstají.

Další možnost snížení přesnosti může způsobit neurčitost vstupující do vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže. Konkrétně může být řešení ovlivněno například dalšími drobnými přítoky vody do nádrže a přítokem vody z okolních svahů nádrže nebo srážkou nad vodní hladinou. Na druhou stranu v málo vodném období jsou srážky minimální nebo žádné a drobné přítoky do nádrže vyschlé nebo zanedbatelné.

Je také zřejmé, že se velikost nejistoty na přítoku vody do nádrže v čase měnila dle vývoje metod měření. V začátcích měření, v některých případech i před 100 lety, se nejistota měření výrazně lišila v porovnání s dnešními moderními přístroji. V disertační práci (Marton, 2012) a práci (Marton a kol., 2011) byla na 3 anonymních profilech testována vstupní nejistota měsíčních průtoků na výsledný zásobní objem nádrže. Vstupní nejistoty typu B byly zadány na plovákovém zařízení  $\pm 0,133$  % měřené hodnoty a pro hydrometrické měření  $\pm 2,0$  %. Rozšířená nejistota hodnot měsíčních průtoků pro koeficient rozšíření  $k = 3,0$  dosahovala v průměru  $\pm 2,69$  %,  $\pm 1,65$  % a  $\pm 1,52$  % pro jednotlivé profily. Maximální vyskytnutá rozšířená nejistota měsíčního průtoky pro  $k = 3,0$  dosáhla  $\pm 6,74$  %. Obdobně v bakalářské práci (Paseka, 2014) zabývající se odhadem nejistot měření v měrném profilu Prostřední Poříčí dosahovaly výsledné rozšířené nejistoty měsíčních průtoků hodnot přibližně  $\pm 1,4$  až  $\pm 2,3$  %. Tedy celkový rozptyl výsledných měsíčních průtoků lze uvažovat přibližně do 5 %.

Oproti tomu charakteristiky povodňových režimů jsou v porovnání s měsíčními průtoky zatíženy výrazně vyšší nejistotou. Stanovení teoretických povodňových vln se během let měnilo. Dříve byly většinou poskytovány jenom údaje o N-letých průtocích. V 60. letech minulého století byly publikovány N-leté průtoky v Hydrologických poměrech ČSSR (Zítek, 1967). Tyto hodnoty byly následně nahrazovány novějšími výsledky, především zpracováním tzv. katastrů vodnosti v 80. letech minulého století. Tyto hodnoty byly dále

Podle třídy spolehlivosti hydrologických údajů se pohybují pravděpodobné chyby pro  $Q_I$  až  $Q_{10}$  v rozmezí  $\pm 15 \%$  až  $\pm 50 \%$  a pro  $Q_{20}$  až  $Q_{100}$  dokonce  $\pm 25 \%$  až  $\pm 60 \%$  (ČSN 75 1400, 2014). V těchto chybách je mimo jiné zahrnuta nepřesnost při měření velkých průtoků. Nižší hranice je udávána pro hodnoty dlouhodobě pozorovaných přímo v daném profilu nebo v jiném velmi blízkém profilu na témže toku. Naopak vyšší hranice chyb jsou pro údaje odvozené z pozorovaných hodnot do profilu mimo pozorovaný tok nebo ze srážek mimo jeho povodí.

Batygrafické křivky symbolizují morfologii údolí a jsou základním podkladem již v rámci přípravy podkladů vodohospodářského řešení. Jedná se o čáru zatopených ploch  $F(h)$  a čáru zatopených objemů  $V(h)$ . Tyto dvě křivky udávají závislost mezi nadmořskou výškou vodní hladiny  $H$  [m n. m.] a příslušnou plochou hladiny  $F$  [m<sup>2</sup>] a dále závislost mezi nadmořskou výškou vodní hladiny  $H$  [m n. m.] a odpovídajícím zatopeným objemem  $V$  [m<sup>3</sup>] (Broža, 1981).

Během provozu nádrží ovšem dochází ke změnám morfologie, ať už boční erozí, sesuvem půdy, splavem a zanášením z okolních ploch, také dochází k zanášení tokem nebo naopak může nastávat vymílání proudem vody na přítoku vody do nádrže. Otázkou tedy je, jak se morfologie údolí nádrže mění během několikaletého provozu nádrže. Na tuto otázku lze částečně odpovědět základním rozdělením typických nánosů splavenin v nádrži na základě

dnových splavenin z přítoku vody do nádrže podle (Morris a Fan, 1998). Konkrétně mohou nastat 4 varianty a to (i) delta nános, kdy se dnové sedimenty usadí na začátku nádrže, (ii) zužující se nános, kdy se splaveniny usazují postupně na přítoku a nános se zužuje směrem do nádrže (iii) rovnoměrný nános, kdy se plaveniny usazují postupně a rovnoměrně po celé délce dna nádrže a (iiii) klínový nános, kdy se plaveniny budou usazovat až v nejhlubším místě nádrže, tedy v mrtvém prostoru nádrže. Vývoj zanášení nádrží také lze řešit moderní měřicí technikou. V dnešní době například Povodí Moravy, s.p. provozuje speciální motorové plavidlo, které je určeno k měření hloubek vodních nádrží. Měření je prováděno pomocí ultrazvukového hloubkoměru, který je schopen zaměřit dno od 0,3 do 9 999 m pod hladinou. Echograf vysílá dva druhy pulsů a to 200 kHz k odrazu tzv. měkkého dna a 30 kHz k odrazu tzv. tvrdého dna. Všechna data jsou měřena prostorově ve formátu souřadnic  $x,y,z$  pomocí satelitního systému GPS s přesností v řádech cm (Měřicí loď – Povodí Moravy, 2012). Dále firma Vars nabízí zaměření hloubek a sedimentů v tocích a nádržích moderně vybavenou lodí (Systém měření – firma Vars, 2018). Měřicí plavidlo Caperea pomocí sonarů a GPS dokáže měřit hloubky od 0,5 m po 100 m s přesností odpovídajícímu běžnému měření na souši. Výsledky těchto měření dokážou přesně vypočítat míru zanesení nádrží, stanovit objemy vodních nádrží a také mohou sloužit k vytvoření digitálního modelu terénu. Opakováním měření v čase pak lze zjistit rychlost zanášení jednotlivých nádrží a také vývoj batygrafických křivek v čase.

Zmiňované moderní měření se zatím dlouhodobě neprovádí a výsledky nejsou běžně dostupné a nijak známé. Můžeme tedy pouze odhadovat nepřesnost batygrafických čar a zanášení nádrží během provozu. Možné by bylo vyčíslení a porovnání odchylek alespoň původních batygrafických křivek s nově provedeným mapováním dna, resp. digitálním modelem terénu. Na druhou stranu pod zásobním prostorem je ještě prostor stálého nadržení, který například zanášení nádrže do značné míry eliminuje, a tudíž zmiňované vlivy nemusí mít až takové následky na návrh zásobního prostoru nádrže.

- Výpar z vodní hladiny

Výpar neboli evaporace plyne z neustálého pohybu molekul vody, který se urychluje s narůstající teplotou. Některé molekuly při tomto procesu překonávají přitažlivost sousedních molekul a tím přecházejí do ovzduší. Proniknutí vodní páry do ovzduší nastává difuzí nebo pomocí vzdušných proudů. Výpar je jedna z nejobtížnějších veličin na stanovení. Intenzita je ovlivňována velikostí plochy, teplotou, vlhkostí vzduchu, silou a prouděním vzduchu, barometrickým tlakem, nadmořskou výškou a dalšími faktory. V našich podmínkách je velikost výparu z vodní hladiny přibližně v rozmezí 1 až 3 mm za den a 200 až 800 mm za rok (Starý, 2005a).



Pro odhad výparu existuje řada přímých a nepřímých metod. Kdy přímé metody jsou určeny měřením a nepřímé jsou pak vyjádřeny pomocí empirických vzorců. Na území ČR se evaporace měřila pomocí zařízení GGI-3000. Metodika tohoto měření včetně statistických vyhodnocení z vybraných klimatických stanic v ČR za období 1971 až 2000 je podrobněji popsána v (Kohut a kol., 2013). V další studii (Knozová a kol., 2005) došlo k porovnání mezi vypočítaným výparem z vodní hladiny empirickým vzorcem podle tzv. metodiky FAO a naměřenými daty ČHMÚ v období květen až září v letech 1971 až 2000. Srovnání řad denního výparu ukázalo, že denní hodnoty vykazují obdobné průběhy, ale při extrémních hodnotách mezi oběma řadami existují již výrazné rozdíly. Průběh naměřených dat charakterizuje větší variabilita a korelační koeficient průměrně dosahoval 0,70. Vypočítaný výpar obvykle přesahoval naměřenou hodnotu v dlouhodobém průměru přibližně o 0,8 mm za den, v extrémním případě až o 6,9 mm. Na velikost odchylek mohly mít také vliv chybějící data v naměřených řadách, které byly právě doplněny vypočítaným výparem.

Dnes jsou přístroje GGI-3000 nahrazeny novějšími přístroji, a to výparoměry EWM. Využitím principu spojených nádob dochází k vyrovnání hladin ve výparoměrné a měřicí nádobě. Hladina vody v měřicí nádobě je měřena plovákovým způsobem, přičemž poloha plováku je sledována precizním digitálním optickým snímačem polohy s rozlišením 0,025 mm. Registrují se jak úbytky vody výparem, tak i vzestupy hladiny vlivem srážek. Vlastní konečný výpar je dán součtem rozdílů výšek hladin a úhrnu spadlých srážek. Toto měření je kontinuální a lze získat i denní průběhy chodu výparu. Pro co největší přesnost je nezbytnou podmínkou dodržení technologického postupu údržby zařízení a pomocí srážkoměru stanovit korekci srážek. Výrobce uvádí přesnost měření 1 mm vodní hladiny. V porovnání s ručním měřením GGI-3000 je dnešní automatické měření srovnatelné, podstatně méně zatíženo náhodnými a systematickými chybami (Bareš a kol., 2006).

Pokud ovšem není měření k dispozici, tak se výpar určuje především ze závislosti na nadmořské výšce hladiny a tabulky % ročního výparu v určitých měsících dle ČSN 75 2405 (ČSN 75 2405, 2017), dříve označena jako ON 73 6815. Jedná se pouze o přibližné stanovení ztráty vody výparem. Následující tabulka procentuálního podílu výparu  $K$  nebyla během posledních let zpřesněna například na vývoj změny teplot vzduchu v čase, proto se následující vyhodnocení musí uvažovat s patřičnou rezervou.

**Tab. 1** Rozložení procentuálního podílu výparu  $K$  v průběhu kalendářního roku

měsíc	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
$K[\%]$	1	2	6	9	12	14	16	15	11	7	5	2

Na samotné velikosti nejistoty výparu je proto velice podstatné, zda byl výpar z vodní hladiny na dané nádrži naměřen (nejpřesnější), vypočítán empirickým vzorcem nebo

stanoven podle nadmořské výšky dle zmiňované ČSN (méně přesné). Navíc ještě dochází k mnoha ovlivňujícím faktorům, jako například vliv rostlin na vodní hladině, zamrznutí vodní hladiny apod. Především u velkých vodních ploch, představuje každý mm výparu nezanedbatelné množství vody, která se vypaří, a proto je třeba při vodohospodářském řešení uvažovat a pracovat s nejistotou výparu z vodní plochy.

- Průsak tělesem hráze a podloží

Průsak vody tělesem hráze je možno orientačně spočítat, odhadnout podle zkušeností s nádržemi v obdobných podmínkách nebo přímo měřit v rámci monitoringu hrází (nejpřesnější). Ztrátový odtok je závislý na nadmořské výšce hladiny. Pro vynesení této závislosti se uvažuje, že při snížení hladiny na polovinu se sníží ztrátový odtok o 20 %. Musíme tak brát v úvahu, že v prvních letech bývá průsak nádrže nejvyšší a časem se postupně zmenšuje. Hodnota průsaku tělesem hráze odvozená z empirického pozorování podle Šimka (Starý, 2006a) pro gravitační betonové těleso hráze činí  $0,15 \text{ l s}^{-1}$  na  $1\,000 \text{ m}^2$ .

Průsak vody podloží nebo okolo hráze je z pohledu heterogenity podloží, ovlivnění půdními a geologickými poměry, svahy, proměnlivosti spádu a další na výpočet problematický a přímé vyčíslení je téměř nemožné.

- Ostatní

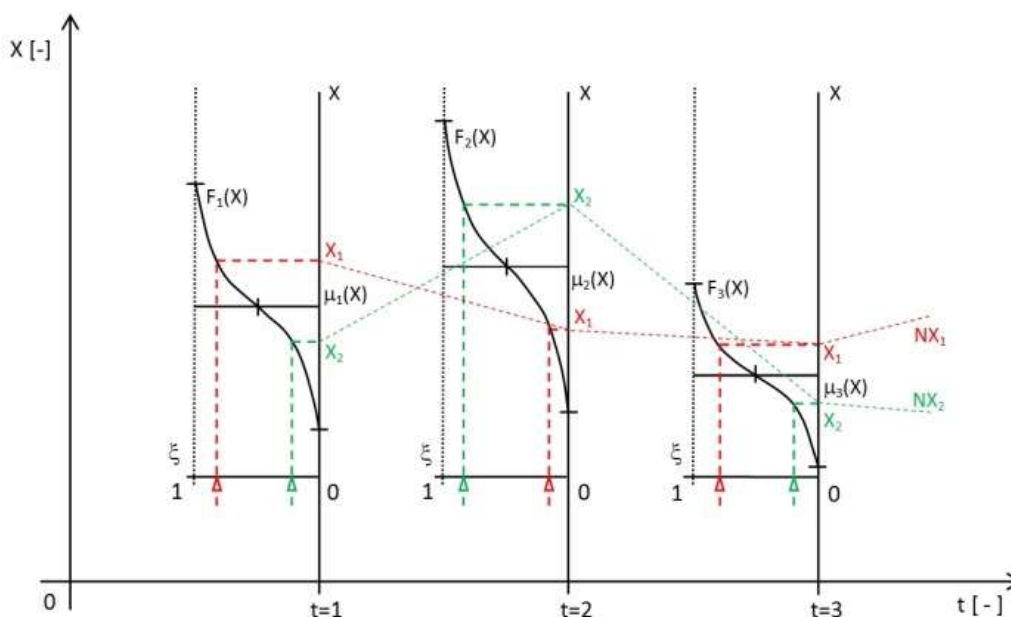
Ztráty vznikají i v dalších případech jako jsou ztráty vody netěsností uzávěrů. Ty se dají stanovit podle hodnot ztrátových součinitelů uvedených výrobcem uzávěrů nebo se stanoví z příslušné literatury, kterou je TNV 75 0910 Dovolené průsaky uzávěrů vodních děl. Dále může docházet ke ztrátám vody tvořením ledu, které se především uplatňují u nádrží s plochými břehy a velkými poklesy hladiny v zimním období, kdy ledová pokrývka dosedá na břehy, a tím dočasně zmenšuje objem vody v nádrži. V našich podmínkách se ztráta vody tvořením ledu do výpočtů neuvažuje (Starý, 2006a).

#### 4.1.2 Aplikování vstupních nejistot metodou Monte Carlo

Pro generování nejistotou zatížených vstupních hydrologických a provozních parametrů je pro zavedení nejistoty všech vstupních veličin do výpočtů použito metody Monte Carlo, která je metodou stochastickou. Metoda Monte Carlo potřebuje pro generování dat generátor pseudonáhodných čísel, který je základem simulačních programů. Kvalitní generátory mají konstantní hustotu pravděpodobnosti generovaných pseudonáhodných čísel, tzv. bílý šum. Mezi vygenerovanými náhodnými čísly potom neexistuje žádná závislost, to znamená, že autokorelační funkce generovaných hodnot se blíží nebo v ideálním případě se rovná nule. Tato metoda se v dnešní době využívá v širokém spektru odvětví, ať už v matematice, ve finančních a obchodních oblastech, fyzice, výpočetní technice, v teorii her atd.

Pro vytvoření algoritmu, který generuje náhodné řady se zatížením nejistot jsou zavedeny následující předpoklady. Obecná vstupní hodnota  $X$  vzniklá z měření je považována za náhodnou (stochastickou) veličinu. Tento předpoklad umožňuje generovat nové hodnoty  $X_i$  okolo vstupní hodnoty  $X$  vzniklé z měření naprosto náhodně a nezávisle na sobě. Veličina  $X_i$  je tedy náhodnou a nezávislou na hodnotě  $X_{i-1}$  a  $X_{i+1}$ . Náhodné generované veličiny  $X_i$  jsou výsledkem většího počtu vzájemně nezávislých jevů, což umožňuje popsat vstupní hodnotu odpovídajícím normálním rozdělením pravděpodobnosti  $N(\mu(X), \sigma(X))$ . Zavedení normálního rozdělení pravděpodobnosti umožňuje zadávat v okolí výsledné hodnoty náhodné veličiny pomocí střední hodnoty  $\mu(X)$  jako naměřená hodnota a směrodatné odchylky  $\sigma(X)$  jako standardní nejistota. Při výpočtech je uvažováno pouze se standardní nejistotou měření typu B  $u_{B,X}$ . Na závěr je zavedeno zjednodušení, kdy je standardní nejistota měření  $u_{B,X}$  zaváděna pomocí relativní hodnoty koeficientu variace  $C_v(X)$ , viz vztah (18) a výsledná směrodatná odchylka  $\sigma(X)$  je následně dopočítána dle vztahu (17).

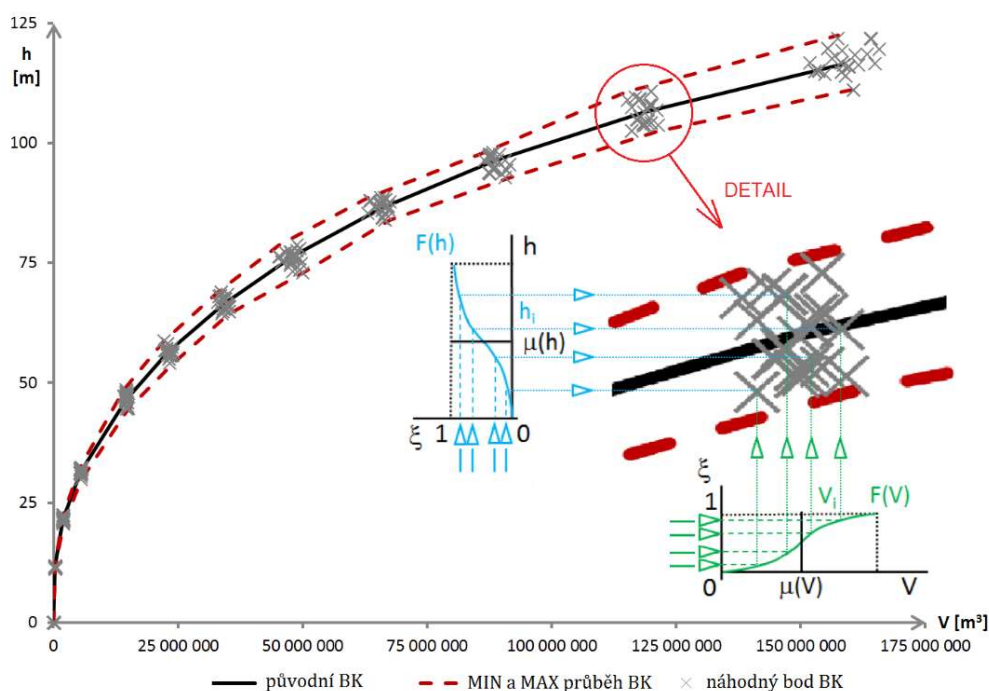
Podstatou generátoru náhodných řad je opakované použití metodou Monte Carlo. Následně jsou ke každé střední hodnotě  $\mu_t(X)$  vytvořeny distribuční křivky  $F_t(X)$  normálního normovaného rozdělení pravděpodobnosti  $N(\mu(X), \sigma(X))$  pro  $t = 1, 2, \dots, PP$ , kde  $PP$  je celkový počet prvků (např. celkový počet průměrných měsíčních přítoků nebo celkový počet bodů čar zatopených objemů  $V(h)$ ). Použitím generátoru pseudonáhodných čísel, který generuje náhodná čísla z intervalu  $\zeta \in \langle 0,1 \rangle$ , jsou opakovaně generovány náhodné průběhy řady prvků  $X_{t,i}$ , označovány jako náhodné polohy hodnot  $NX_{t,i}$  v intervalu zadané nejistoty pro  $i = 1, 2, \dots, PO$ , kde  $PO$  je celkový počet opakování (generování). Obecný princip generování náhodných poloh vstupních parametrů v 1D souřadnicovém systému je zobrazen na Obr. 2. Tento princip aplikace nejistot včetně Obr. 2 vychází z (Starý, 1984) a (Marton, 2011).



**Obr. 2** Schéma obecného principu generování nejistot vstupních prvků metodou Monte Carlo pro 1D souřadnicový systém

Tento pospaný postup generování náhodných prvků lze uplatnit na všech veličinách vstupujících do vodohospodářského řešení zásobního a retenčního prostoru nádrže s výjimkou batygrafických křivek nádrže.

Pro případ, kdy se jedná o 2D souřadnicový systém, je přístup generování částečně odlišný. Základní princip generování náhodných poloh bodů ( $NX_{b,i}, NY_{b,i}$ ) je shodný s teorií popsanou výše. Podle (Marton, 2011) je odlišnost dána pouze sestavením bodu, který vyžaduje sestavení dvou na sobě nezávislých Monte Carlo generátorů. Každý generátor sestrojí náhodnou polohu bodu  $NX_{b,i}$  (např. výška vodní hladiny  $Nh_{t,i}$ ) a k ní náhodnou hodnotu  $NY_{b,i}$  (např. objem vody v nádrži  $NV_{t,i}$ ). Společně náhodné polohy dvou bodů pak vytvoří náhodnou souřadnici bodu ( $NX_{b,i}, NY_{b,i}$ ), např. náhodná souřadnice bodu čáry zatopených objemů ( $NV_{b,i}, Nh_{b,i}$ ). Série náhodných bodů ( $NV_{b,i}, Nh_{b,i}$ ) pak tvoří náhodné čáry zatopených objemů zatížené nejistotami. Na Obr. 3 je znázorněn princip generovaných náhodných 2D poloh bodů aplikovaných právě na křivce zatopených objemů.



**Obr. 3** Schéma principu generování náhodných poloh bodů  $(V, h)$  křivky zatopených objemů pro 2D souřadnicový systém

#### POZNÁMKA:

Abychom zabránili přeskokování mezi jednotlivými kroky (polohy bodů), tak je generované číslo v rozmezí od 0 do 1 pro všechny prvky (distribuční funkce každé polohy bodu) v daném opakování stejné. Tím je docíleno plynulé rostoucí křivky, tedy tomu, že čára zatopených objemů díky generování náhodných poloh bodů ve svém průběhu neklesá.

## 4.2 Simulační modely nádrže

Při vodohospodářském řešení zásobního prostoru nádrže hledáme vztah mezi třemi veličinami (Starý, 2006b). Konkrétně mezi hodnotou zásobního objemu  $V_Z$ , nejlepšího odtoku  $O_P$  a zabezpečeností nejlepšího odtoku  $P$  při předem známém časovém průběhu přítoku vody do nádrže  $Q$ . V této práci jsou použity následující typy úloh, konkrétně na stanovení zásobního prostoru  $V_Z$ , který bude funkcí požadovaného odtoku  $O_P$  a zabezpečenosti  $P = 100 \%$ , tedy  $V_Z = f(O_P, P)$  pro  $P = 100 \%$ . Dalším typem úlohy je stanovení zabezpečenosti  $P$ , kdy zabezpečenost  $P$  je funkcí požadovaného odtoku  $O_P$  a zásobního objemu  $V_Z$ , tedy  $P = f(O_P, V_Z)$ . Tato úloha opakovaným řešením poslouží ke stanovení optimálního řešení zásobního objemu nádrže  $V_Z$ , který bude funkcí požadovaného odtoku  $O_P$  a přesně dané zabezpečenosti dle manipulačního řádu, ale nižší než  $100 \%$ , tedy  $V_Z = f(O_P, P)$  pro  $P < 100 \%$ . Naopak při vodohospodářském řešení retenčního prostoru se vychází z velikosti a transformace povodňové vlny, jak je popsáno v podkapitole 4.2.5.

#### 4.2.1 Stanovení zásobního prostoru nádrže pro zabezpečení 100 %

Pro tento typ úlohy platí, že se řešení provádí v jediné variantě jednorázovou simulací provozu nádrže. Počáteční podmínkou je plná nádrž v začátku testovaného období a okrajovou podmínkou je řada přítoků vody do nádrže v příslušném časovém kroku. V každém kroku je prováděna bilance mezi požadovaným odtokem  $O_{Pi}$  a přítokem vody do nádrže  $Q_i$ . Jestliže platí  $O_{Pi} > Q_i$ , nádrž se prázdní a jestliže  $O_{Pi} < Q_i$ , potom dochází k plnění nádrže.

V každém bilančním kroku neboli na konci každého měsíce se stanovuje tzv. simulace prázdnění nádrže. Změna prázdnění nádrže na konci každého měsíce se získá tak, že dílčí bilance mezi požadovaným odtokem a přitéklým objemem vody přičteme ke stavu prázdnění na konci předchozího měsíce neboli  $\sum(O_{Pi} - Q_i) \Delta t$ . Pokud je nádrž plná a přítok  $Q_i$  je v daném měsíci větší než požadovaný nejlepší odtok  $O_{Pi}$ , potom je odtok roven přítoku. V takovém případě je  $\sum(O_{Pi} - Q_i) \Delta t = 0$ . Vztah je roven 0 i v případě, kdy dojde k naplnění již v průběhu měsíce. Provedením simulace prázdnění nádrže v řešeném časovém období je nalezena maximální hodnota prázdnění nádrže za celé řešené období, která je považována za zásobní objem nádrže  $V_Z$  se zabezpečeností  $P = 100 \%$ . To znamená, že v nádrži pro řešené období nevznikne nedodávka vody vyvolaná nedostatečným přítokem vody do nádrže, resp. málo vodným či suchým obdobím (Starý, 2006a).

Základem simulačního modelu nádrže pro výpočet vodohospodářského řešení zásobní funkce nádrže se zabezpečeností  $P = 100 \%$  je upravená základní rovnice nádrže v součtovém tvaru převedená do následující nerovnosti (7) (Starý, 2006a)

$$0 \leq \sum_{i=0}^{k-1} (O_i - Q_i) \Delta t + (O_k - Q_k) \Delta t \quad (7)$$

kde

$O_i$  je odtok vody z nádrže [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] v daném měsíci pro  $i = 1, \dots, k$ ,

$Q_i$  je přítok vody do nádrže [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] v daném měsíci pro  $i = 1, \dots, k$ ,

$\Delta t$  je časový krok výpočtu jeden měsíc.

V kroku  $i+1$  je hodnota  $O_k$  nejprve nahrazena hodnotou požadovaného nejlepšího odtoku  $O_p$ . Časový průběh vyčíslované sumy pravé strany rovnice simuluje průběh prázdnění zásobního objemu nádrže po časových krocích  $i = 1, \dots, k$ . Pro  $i = 0$  je třeba za hodnotu sumy zadat počáteční podmínku řešení, kterou je počáteční objem vody v nádrži.

Nerovnost (7) je z levé strany omezena hodnotou 0, která značí plný zásobní objem nádrže. Vypočtením hodnoty výrazu je získáno aktuální prázdnění zásobního objemu  $V_{Z,i+1}$ . Hledaný zásobní objem je pak ten, kdy je dosažena maximální hodnota vyprázdnění nádrže za řešené období.

#### 4.2.2 Stanovení zásobního prostoru nádrže pro zabezpečení menší než 100 %

Tento typ úlohy nelze řešit přímo v jedné variantě. Pro stanovení optimálního zásobního objemu nádrže  $V_Z = f(O_P, P)$  pro  $P < 100 \%$ , který je funkcí požadovaného odtoku  $O_P$  a předem dané zabezpečení, která je menší než 100 %, slouží opakované výpočty stanovení zabezpečení  $P = f(O_P, V_Z)$  pro předem daný požadovaný odtok  $O_P$  a zásobní objem  $V_Z$ .

Hledaným parametrem je tedy zásobní objem  $V_Z$  a kritériem je zabezpečení nádrže, která je stanovena dle manipulačního řádu, ale nižší než 100 %. Pro každou volenou hodnotu parametru  $V_Z$  se řeší dílčí úloha  $P = f(O_P, V_Z)$ . Pro tento typ vodohospodářského řešení jsou povoleny poruchy vody z nádrže dle významnosti nádrže. Stejně jako pro předchozí úlohu popsané v podkapitole 4.2.1 je počáteční podmínkou plná nádrž v začátku testovaného období a okrajovou podmínkou je řada přítoků vody do nádrže v příslušném časovém kroku a v každém kroku je prováděna bilance mezi požadovaným odtokem  $O_P$  a přítokem vody do nádrže  $Q$ . Hlavním rozdílem oproti předchozí úloze je, že se navíc testuje omezující podmínka  $\sum(O_P - Q)$ , neboli zda nedojde na konci každého měsíce k vyprázdnění nádrže, resp. voleného objemu nádrže. Pokud ano, tak nastane porucha odtoku vody z nádrže. To znamená, že ve všech měsících, kdy odtok vody  $O_i$  je menší než požadovaný odtok  $O_P$ , nastane porucha v dodávce vody z nádrže. Zaznamená se celkový součet všech poruchových měsíců, celkové množství nedodané vody oproti plánované hodnotě a jsou vypočteny příslušné zabezpečení. Jsou známy zabezpečení podle opakování, podle trvání a podle množství nedodané vody (Starý, 2006a). Nejpoužívanější u nás je zabezpečení podle trvání  $P_T$ , která je udávána i v manipulačních řádech nádrží. Obecnou definici zabezpečení vodohospodářských systémů postupně popsali (Kritskiy a Menkel 1952), poté (Klemeš, 1967) a (Hashimoto a kol., 1982).

Základem simulačního modelu dílčí úlohy  $P = f(O_P, V_Z)$  je upravená rovnice nádrže v součtovém tvaru převedená do následující nerovnosti (8) (Starý, 2006a)

$$0 \leq \sum_{i=0}^{k-1} (O_i - Q_i) \Delta t + (O_k - Q_k) \Delta t \leq V_{Z,max} \quad (8)$$

kde

$O_i$  je odtok vody z nádrže [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] v daném měsíci pro  $i = 1, \dots, k$ ,

$Q_i$  je přítok vody do nádrže [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] v daném měsíci pro  $i = 1, \dots, k$ ,

$\Delta t$  je časový krok výpočtu jeden měsíc,

$V_{Z,max}$  prázdný zásobní objem nádrže [ $\text{m}^3$ ].

Jako v předchozí úloze je v kroku  $i+1$  hodnota  $O_{i+1}$  nejprve nahrazena hodnotou požadovaného nejlepšího odtoku  $O_P$ . Časový průběh vyčíslované sumy simuluje průběh prázdnění zásobního objemu nádrže po časových krocích  $i = 1, \dots, k$ . Pro  $i = 0$  je třeba za hodnotu sumy zadat počáteční podmínku řešení.

Nerovnost (8) je zleva i zprava omezená. Z levé strany je omezena hodnotou 0, která opět značí plný zásobní objem nádrže a z pravé strany hodnotou  $V_{Z,max}$ , která v tomto případě charakterizuje prázdný zásobní objem nádrže. Vypočtením hodnoty výrazu je získáno aktuální prázdnění zásobního objemu, které je následně testováno, zda leží v daném intervalu  $\langle 0, V_{Z,max} \rangle$ . Pokud ne, je třeba nalézt hodnotu  $O_{i+1}$  tak, že se buď položí výraz pod sumou rovný nule, a tím vznikne jalový odtok nebo výraz pod sumou se položí rovno  $V_{Z,max}$ , v tomto případě vznikne porucha vody v nádrži (Starý, 2006a).

Klasifikace poruchy zásobního objemu nádrže pro výpočet zabezpečení podle trvání je následující (Hashimoto a kol., 1982) (9)

$$Z_{t,i} = \begin{cases} Z_{t,i} = 1, & O_i > O_P \\ Z_{t,i} = 0, & O_i < O_P \end{cases} \quad (9)$$

kde

$Z_{t,i} = 1$  popisuje stav  $V_Z$  nádrže v bezporuchovém (vyhovujícím) časovém kroku výpočtu

$Z_{t,i} = 0$  popisuje stav  $V_Z$  nádrže v poruchovém (nevyhovujícím) časovém kroku výpočtu.

Míra zabezpečení nejlepšího odtoku  $O_P$  jako výsledek řízení odtoku je pravděpodobnost, že skutečný odtok vody z nádrže neklesne pod hodnotu nejlepšího odtoku  $O_P$ , tzv. požadovaného odtoku. V tomto případě je aplikována zabezpečení podle trvání  $P_T$ , kterou lze dopočítat z hodnot  $Z_{t,i}$  a odvodit dle Čegodajeva (Starý, 2005b) (10)

$$P_T = \frac{(\sum_{i=1}^k Z_{t,i}) - 0,3}{k + 0,4} \cdot 100, [\%] \quad (10)$$

kde

$\sum_{i=1}^k Z_{t,i}$  součet záznamů poruchových a bezporuchových měsíců,

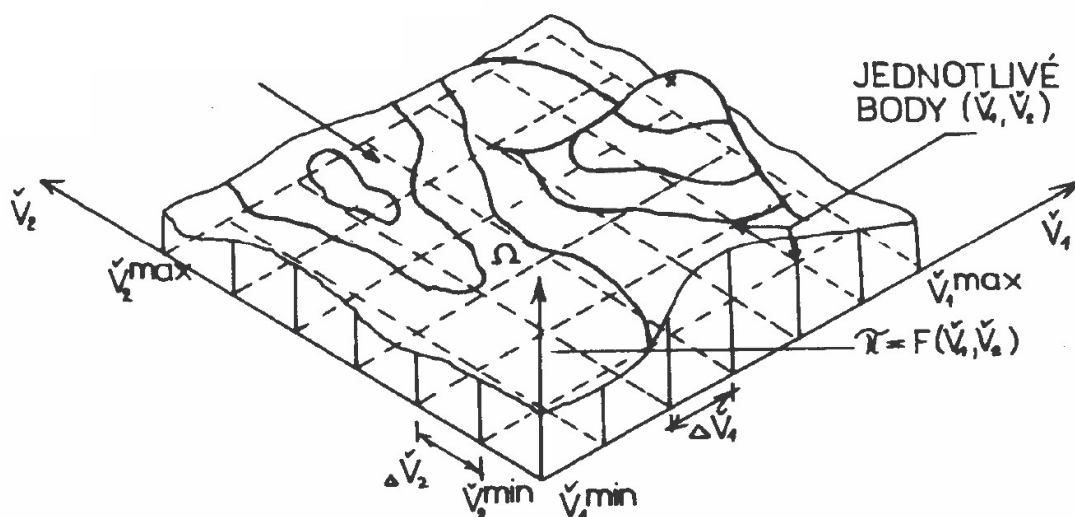
$k$  počet všech měsíců vstupní časové řady.



Vstupní hodnotou pro řešení úlohy  $V_Z = f(O_P, P)$  pro  $P < 100 \%$  je výsledný zásobní objem z předchozí úlohy pro stanovení  $V_Z$  pro zabezpečení 100 % popsané v podkapitole 4.2.1. Poté je volena hodnota parametru (zásobní objem) a opakovaně simulována nová varianta provozu nádrže dle nerovnice (8) a následně je vyhodnoceno sledované kritérium  $\pi$  (pokles zabezpečení) dle rovnic (9) a (10). Řešením je varianta, ve které se kritérium shoduje s požadovanou hodnotou. V této variantě se volený parametr stává výsledkem řešení. Úloha vede k optimalizaci, ve které je neznámou řešený parametr a kritériem je rozdíl mezi vypočtenou a požadovanou zabezpečeností, který se minimalizuje (Starý, 2006a).

#### 4.2.3 Optimalizace

Pro hledání zásobního objemu nádrže pro zabezpečení nižší než 100 % byla použita jednoduchá optimalizační metoda tzv. jednotná mřížková metoda (klasický simulační model), kdy jsou na přípustných intervalech voleny parametry s pevným krokem. Řešených variant je pak konečný počet, který si lze předem určit. Kombinace hodnot parametrů tak vytváří pravidelnou mřížku v určeném prostoru  $\Omega$ . Každá kombinace možných parametrů určuje jednu variantu řešení. Výhodou mřížkové metody je to, že je systematicky prohledávaná celá oblast řešení, což umožňuje nalézt vždy globální extrém kritériální funkce. Na druhou stranu je nevýhodou velký počet řešených variant. Přesnost závisí na velikosti kroku změn parametrů. Za účelem snížení času výpočtu (počtu variant) se řešení může provádět nejprve s většími kroky parametrů (na hrubší rozlišovací úrovni), čímž se vymezí přibližně oblast hledaného řešení. Následně se na této vymezené oblasti provede řešení s menšími kroky parametrů (na jemnější rozlišovací úrovni). Příklad mřížkové metody pro dva hledané parametry a 1 rozlišovací úroveň je na Obr. 4 (Starý, 2006b).



**Obr. 4** Schéma principu mřížkové metody a volby parametrů (Starý, 2006b)

#### 4.2.4 Zavedení ztráty vody z nádrže do vodohospodářského řešení zásobního objemu

Simulační model vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže do výpočtů zahrnuje mimo jiné i ztráty vody z nádrže. Jak již bylo řečeno, tak zahrnuje ztráty vody výparem z vodní hladiny a průsakem tělesa hráze. Princip zavedení ztrát vody z nádrže je stejný jako v habilitační práci (Marton, 2018). K efektivnímu zavedení ztrát do řešení jsou ztrátové průtoky započítány pomocí opakované simulace, jinými slovy ve dvou krocích, při kterých je respektována počáteční podmínka řešení simulačního modelu v podobě plné nádrže. Nejprve je proveden výpočet zásobního objemu nádrže při požadovaném odtoku  $O_P$  bez uvažování ztrát vody z nádrže. Tím je nalezen maximální objem vody v nádrži, který je tvořen z objemu zásobního a objemu stálého nadržení, který následně vstupuje do druhého kroku řešení.

Z maximálního objemu vody v nádrži z prvního kroku se stává počáteční objem pro stanovení počáteční zatopené plochy a výšky vodní hladiny v nádrži. Tyto hodnoty jsou odečteny z batygrafických křivek. Pomocí počáteční hladiny, zatopené plochy a velikosti měsíčního výparu v počátečním měsíci je dopočítána hodnota objemu odpařené vody v daném měsíci, která je následně převedena na ztrátový odtok. Dále je k výšce vodní hladiny zjednodušeně stanovena potenciální průsaková (průtočná) plocha tělesa hráze, která slouží ke stanovení ztrátového odtoku průsakem tělesa hráze. Výsledná hodnota ztrátového odtoku vody z výparu vodní hladiny a průsaku tělesem hráze je následně odečtena od hodnoty přítoku vody do nádrže v počátečním měsíci řešení.

Takto upravená hodnota přítoku vody do nádrže, která je snížena o celkový ztrátový odtok, znovu ve druhém kroku vstupuje při daném  $O_P$  do opakovaného výpočtu simulace nádrže. Tím vzniká postupná bilance, kdy je do výpočtu po sobě zahrnuto snižování aktuální hladiny vody v nádrži v každém měsíci vlivem ztrát vody. Uvedený postup je postupně opakován pro všechny měsíce řešeného období.

#### 4.2.5 Stanovení retenčního prostoru nádrže

Pro transformace povodňových vln lze využít několik metod, které většinou vychází ze simulace provozu nádrže. Známé jsou např. numerické metody Runge – Kutta 2. řádu, metody Runge – Kutta 4. řádu a grafická metoda Klemešova, viz (Starý, 2006a). K transformaci lze využít i matematického modelování pomocí dostupných softwarů.

V této práci se pro stanovení retenčního prostoru nádrže v podmínkách nejistot vycházelo z grafické Klemešovy metody (Klemeš, 1960) z důvodu jednoduchosti a rychlosti. Grafická metoda byla pro účely výpočtů disertační práce matematizována. Princip metody vychází z diferenciální rovnice nádrže, která vyjadřuje vztah mezi přítokem vody do nádrže  $Q$  jako funkcí času  $t$ , odtokem vody z nádrže  $O$  jako funkcí času  $t$  a objemem zadržené vody

v nádrži  $V$ . Diferenciální rovnice nádrže je pak pro Klemešovu metodu upravena na následující tvar (11)

$$Q\Delta t - O\Delta t = \Delta V \quad (11)$$

Mimo jiné jsou zaváděny následující zjednodušení, přestože se hodnoty přítoku a odtoku v průběhu děje za časový interval  $\Delta t$  spojitě mění, považujeme je za konstantní neboli rovné průměrným hodnotám přítoku a odtoku v daném časovém intervalu  $\Delta t$ . Metoda realizuje zjednodušení tím, že plynulé křivky přítoku a odtoku nahrazuje stupňovitými čarami, jejichž jednotlivé stupně jsou průsečíky střednic časových intervalů. Přítok i odtok v každém intervalu je tedy reprezentován jedinou okamžitou hodnotou. Samotná Klemešova metoda vstupuje do výpočtu až tehdy, kdy je překročen bezpečnostní přeliv. Pokud je voda pod úrovní bezpečnostního přelivu, tak výpočet pouze bilancuje objem přítoku a odtoku vody k předchozímu objemu nádrže.

Hlavními podklady pro Klemešovu metodu jsou hydrogram povodně, informace o spodních výpustích, bezpečnostním přelivu a čára zatopených objemů pro zkonstruování tzv. transformační křivky, která vyjadřuje celkový odtok vody z nádrže v závislosti na jejím plnění. Transformační křivka tedy charakterizuje potenciální odtok vody z nádrže a je funkcí objemu nádrže. Pro její určení je dle (Jandora a Šulc, 2006) kapacita spodních výpustí vypočtena podle rovnice (12) a kapacita bezpečnostního přelivu podle rovnice (13):

$$O_v = \mu S \sqrt{2 g h_v} \quad (12)$$

$$Q_{BP} = m b \sqrt{2 g h_p}^{3/2} \quad (13)$$

kde

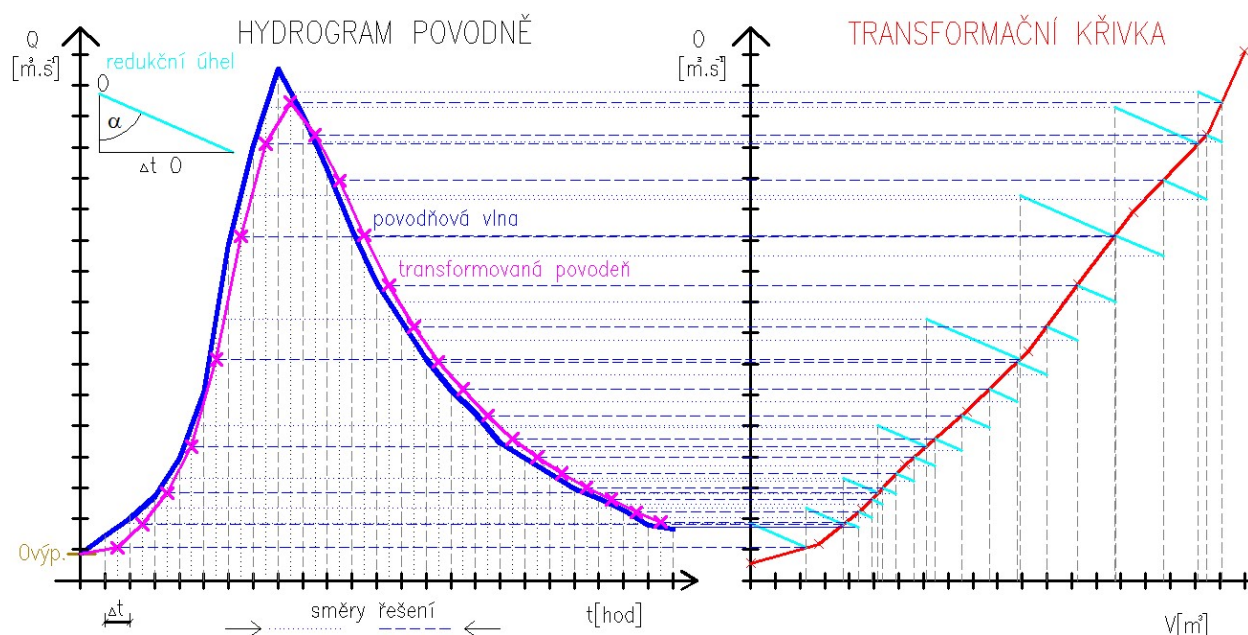
- $\mu$  součinitel odtoku [-],
- $S$  plocha výtokového otvoru (spodních výpustí) [m<sup>2</sup>],
- $g$  tíhové zrychlení [m s<sup>-2</sup>],
- $h_v$  výška vody nad spodními výpustěmi [m],
- $m$  součinitel přepadu [-],
- $b$  šířka bezpečnostního přelivu [m],
- $h_p$  výška vody nad přelivem [m].

### POZNÁMKA:

Transformační křivka je zároveň přizpůsobena stupňovitému průběhu čáry odtoků pomocí korespondujících bodů.

Dále je nutné pro transformaci zkonstruovat tzv. redukční úhel  $\alpha$ , který vychází z velikosti průtoku a časového intervalu a charakterizuje úměrnost mezi vytvořenou plochou obklopenou přítokem a odtokem v daném  $\Delta t$  a délkou vodorovné úsečky transformační křivky daného  $\Delta t$ . Redukční úhel  $\alpha$  se zkonstruuje tak, že k libovolnému průtoku  $Q$  vynesnému na svislici je přiřazena vodorovná osa o velikosti průtoku  $Q$  vynásobeném  $\Delta t$ . Spojením koncových bodů je získána směrnice přímky svírající redukční úhel  $\alpha$ .

Grafická konstrukce Klemešovou metodou probíhá postupně v jednotlivých časových intervalech nejprve na vzestupné a poté na sestupné větvi povodňové vlny přes zmíněnou transformační křivku a redukční úhel  $\alpha$ . Konkrétně při překročení bezpečnostního přelivu je vedena pro daný přítok vody do nádrže z nulové svislice transformační křivky směrnice přímky svírající redukční úhel  $\alpha$  a je hledán průsečík právě s transformační křivkou, který zároveň charakterizuje první hodnotu transformovaného odtoku vody z nádrže. V tomto průsečíku je vytvořena nová svislice pro další krok. Poté je dále postupováno pro každý přítok vody do nádrže v časovém intervalu ze svislice určené z předchozího kroku na transformační křivce vedením směrnice přímky svírající vždy redukční úhel  $\alpha$  a hledáním průsečíku opět s transformační křivkou. Tento průsečík pak charakterizuje transformovaný odtok vody z nádrže v daném časovém kroku. Popsaný postup grafické Klemešovy metody je charakterizován na Obr. 5.



Obr. 5 Princip konstrukce transformace povodňové vlny Klemešovou metodou

### 4.3 Metody pro vyhodnocení

Vygenerované vstupní nejistoty na podkladech do výpočtu vodohospodářského řešení nádrže poskytují spektra velikostí zásobních a retenčních objemů obdobně jako spektra odtoků vody z nádrže. Pro vhodnou prezentaci dosažených výsledků jsou výpočty statisticky vyhodnoceny. Statistické (číselné) charakteristiky a pravděpodobnostní funkce jsou popisujícími charakteristikami používanými v hydrologii pro popis základního souboru hydrologických dat (Starý, 2005a). Pro další zpracování a vyhodnocení výsledků byly ještě použity kvantily, čára pravděpodobnosti překročení a transformační efekt nádrže. Použité metody jsou dále podrobně vysvětleny a zpracovány podle (Starý, 2005a) a (Sadílek a kol, 2010).

#### POZNÁMKA:

Nejpoužívanějšími statistickými charakteristikami jsou střední hodnota  $\mu(X)$ , disperze  $D(X)$ , směrodatná odchylka  $\sigma(X)$ , koeficienty variace  $C_v(X)$ , koeficient asymetrie  $C_s(X)$  a excesu neboli špičatosti  $E(X)$ . V této práci jsou pro prezentaci výsledků použity ze statistických charakteristik pouze střední hodnoty se směrodatnými odchylkami a koeficient variace.

#### 4.3.1 Střední hodnota

Střední hodnota je hodnota prvního obecného momentu značena jako  $\mu(X)$  a je vyjádřena v následujícím tvaru (14)

$$\mu(x) = \int_x x f_x(x) dx \quad (14)$$

Střední hodnota patří k tzv. charakteristikám polohy a její hodnota je  $x$ -ovou souřadnicí těžiště hustoty pravděpodobnosti. Metodou momentů je odhad střední hodnoty vyjádřen vztahem (15)

$$\mu(x) \approx \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (15)$$

kde

$\bar{x}$  výběrový průměr neboli střední hodnota,

$x_i$  prvky náhodného výběru,

$n$  počet prvků náhodného výběru.

#### 4.3.2 Rozptyl a směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka se vyjadřuje jako odmocnina z disperze  $D(X)$  neboli rozptylu. Pokud se hodnota disperze blíží k nule, pak je tvar grafu hustoty pravděpodobnosti úzký a špičatý, pokud na druhou stranu roste hodnota disperze do nekonečna, je tvar grafu hustoty pravděpodobnosti nízký a plochý. Míra rozptýlení náhodné veličiny  $X$  vzhledem k průměru  $\mu_X$  je dána druhým centrálním momentem neboli rozptylem  $D(X)$ , který je vyjádřen v následujícím tvaru (16)

$$D(x) = \int_x (x - \mu(x))^2 f_x(x) dx \quad (16)$$

Směrodatná odchylka taktéž vychází z druhého centrálního momentu a značí se  $\sigma(x)$ . Metodou momentů je směrodatná odchylka vyjádřena vztahem (17)

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu(x))^2}{(n-1)}} \quad (17)$$

#### 4.3.3 Koeficient variace

Obdobně jako disperze a směrodatná odchylka vychází koeficient variace z druhého centrálního momentu. Variační koeficient se značí  $C_v(x)$  a vyjadřuje se jako podíl směrodatné odchylky a střední hodnoty, viz vztah (18)

$$C_v(x) = \frac{\sigma(x)}{\mu(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - \mu(x))^2}{(n-1)}}, \text{ pro } k_i = \frac{x_i}{\mu(x)} \quad (18)$$

#### 4.3.4 Koeficient asymetrie

Koeficient asymetrie se značí  $C_s(x)$  a je definován jako třetí centrální moment dělený třetí mocninou směrodatné odchylky, viz vztah (19)

$$C_s(x) = \frac{1}{\sigma(x)^3} \int_x (x - \mu(x))^3 f_x(x) dx \quad (19)$$

Koeficient asymetrie vyjadřuje šikmost neboli míru asymetrie k vertikální ose grafu. Momentovou metodou je popsán vztahem (20)

$$C_s(x) = \frac{M_3(x)}{\sigma(x)^3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{(n-1)C_v(x)^3}}, \text{ pro } k_i = \frac{x_i}{\mu(x)} \quad (20)$$

#### POZNÁMKA:

U statistických charakteristik se udává, že pro střední hodnotu je nutný počet realizací alespoň 20, pro směrodatnou odchylku a koeficient variace alespoň 40, pro koeficient asymetrie alespoň 80 a koeficient excesu (špičatosti) alespoň 300 realizací, aby výsledná statistická charakteristika byla s chybou maximálně  $\pm 10 \%$ . Metodou Monte Carlo je v této práci vždy generováno 300 opakování. Byl testován i vyšší počet generování vstupních nejistot, což už nemělo žádný efekt na výsledné hodnoty, protože se nijak neměnily, a proto je 300 opakování považováno za dostačující.

#### 4.3.5 Kvantil

Kvantil udává míru polohy rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny. Jinými slovy kvantily popisují body, ve kterých distribuční funkce náhodné proměnné prochází danou hodnotou. V případě spojitého rozdělení, které má distribuční funkci  $F_X(x)$ , je  $p$ -kvantil  $x_p$  taková hodnota náhodné veličiny  $X$ , pro niž platí, že výskyt hodnot menších než  $x_p$  nastane pouze s pravděpodobností  $p$ , tj. pro niž je distribuční funkce  $F_X(x_p)$  rovna pravděpodobnosti  $p$ , viz vztah (21)

$$P(X < x_p) = F_X(x_p) = p \quad (21)$$

Příkladem může být třeba 5 % kvantil ( $p = 0,05$ ) se kterým se lze setkat ve stavebnictví. To znamená, že 5 % prvků souboru má hodnoty menší nebo rovné hodnotě  $x_5$  a zbytek, v tomto případě 95 % prvků souboru, má hodnoty větší nebo rovné  $x_5$ . Dalším známým příkladem je medián neboli 50 % kvantil. Kvantil  $x_{50}$  rozděluje statistický soubor na dvě stejně početné množiny.

#### 4.3.6 Čára pravděpodobnosti překročení

Obecně lze pravděpodobnostní funkce vyjádřit třemi tvary. Hustotou pravděpodobností, distribuční funkcí nebo čarou pravděpodobnosti překročení. Hustota pravděpodobnosti patří do skupiny diferenciálních čar. Její integrací zleva je dána distribuční funkce, její integrací zprava je dána funkce pravděpodobnosti překročení. Jakmile je známa jedna z pravděpodobnostních funkcí lze z ní odvodit průběh dvou zbývajících funkcí.

Funkce hustoty pravděpodobnosti může být uzavřená nebo otevřená. Příslušné meze ohraničení hustoty pravděpodobnosti jsou označeny jako  $a$ ,  $b$ . Hustota pravděpodobnosti je funkce, která vyjadřuje pravděpodobnost výskytu realizace náhodné veličiny. Pro danou realizaci náhodné veličiny  $A$  je obecně vyjádřena jako (22)

$$(A) = P[x = A] \quad (22)$$

Z hustoty pravděpodobnosti je odvozena funkce pravděpodobnosti překročení, její tvar je uveden ve vztahu (23):

$$P(A) = P[x \geq A] = \int_b^A f(x)dx \quad (23)$$

Funkce pravděpodobnosti překročení neboli čára pravděpodobnosti překročení určuje, s jakou pravděpodobností bude náhodná veličina větší nebo rovna hodnotě  $A$ . Čára pravděpodobnosti překročení je funkce klesající a nabývá hodnoty od jedné do nuly.

#### 4.3.7 Transformační efekt

Transformačním efektem nádrže neboli transformačním účinkem nádrže je ve shrnutí výsledků myšlena procentuální změna maximálního transformovaného odtoku ke kulminaci povodňové vlny, jak je popsáno ve vztahu (24)

$$\text{transformační efekt} = 100 - \frac{Q_{\max TP}}{Q_{\max PV}} 100 \quad (24)$$

kde

$Q_{\max TP}$  je maximální transformovaný odtok vody z nádrže [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],

$Q_{\max PV}$  je maximální hodnota povodňové vlny neboli kulminace povodňové vlny [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ].



## 5 VYVÍJENÝ SOFTWARE

### 5.1 UNCE\_RESERVOIR

Pro vodohospodářské řešení zásobního objemu s uvažováním ztrát vody z nádrže a nejistot parametrů vstupujících do řešení byl využíván software UNCE\_RESERVOIR (Marton a kol., 2015d), který byl vytvořen na Ústavu vodního hospodářství krajiny VUT v Brně jako výstup z projektů CZ.1.07/2.3.00/30.0039 „Excelentní mladí vědci na VUT v Brně“ a specifického výzkumu FAST-S-14-2454 „Řízení provozu zásobní funkce soustavy nádrží s použitím optimalizačního modelu“. Úloha programu vychází z řešení základní rovnice nádrže v součtovém tvaru, kdy podstatou úlohy je výpočet maximálního zásobního objemu nádrže při 100 % zabezpečení odtoku vody z nádrže a úloha, kdy je stanovena zabezpečení podle trvání a množství nedodané vody pro známé hodnoty nalepšeného odtoku a zásobního objemu. Řešení uvažuje ztráty vody z nádrže, ale také nejistoty všech vstupujících parametrů do výpočtu. Software UNCE\_RESERVOIR je napsán v programovacím jazyce FORTRAN (FORTRAN 77, 2019a) a (FORTRAN 77, 2019b).

FORTRAN je imperativní programovací jazyk navržený pro vědecké výpočty a numerické aplikace. Jeho hlavní předností je, že je v úzké provázanosti s programovacím jazykem C++, u kterého je zajištěn neustále trvající vývoj. Z toho plyne, že s každou novou verzí jazyka C++ současně vychází i nová verze jazyka FORTRAN. Další výhodou tohoto programovacího jazyka je, že patří mezi programovací jazyky „nízké procesorové úrovně“, to znamená, že umožňuje provádět velmi rychlé výpočty.

Software UNCE\_RESERVOIR byl dále vybaven odpovídajícím grafickým uživatelským rozhraním a testován v rámci specifického výzkumu FAST-S-15-2694 „Propagace nejistot v hydrologických a vodohospodářských aplikacích pro zmírnění dopadů sucha na vodní nádrže“. Výsledky autorů z tohoto výzkumu jsou mj. uvedeny v současném stavu poznání.

Uživatelské rozhraní, které bylo vytvořeno autorem této práce v programu Delphi 7 (Borland Delphi Enterprise, Version 7.0, 2002), uživateli umožní jednoduše zadávat vstupy, nastavovat a provádět výpočty a také přehledně zobrazovat výstupy. Po otevření aplikace uživatelského rozhraní UNCE\_RESERVOIR je na hlavní liště několik záložek, za zmínku stojí především záložky Vstupy, Výpočet a Výsledky. Práce s těmito záložkami je podrobněji popsána v následujících podkapitolách.

#### 5.1.1 Vstupy

Vstupy jsou dále tvořeny Přitoky, Batygrafickými křivkami, Výparem a Průsakem, viz Obr. 6. Nahrání všech vstupních dat do programu UNCE\_RESERVOIR je popsáno dále.



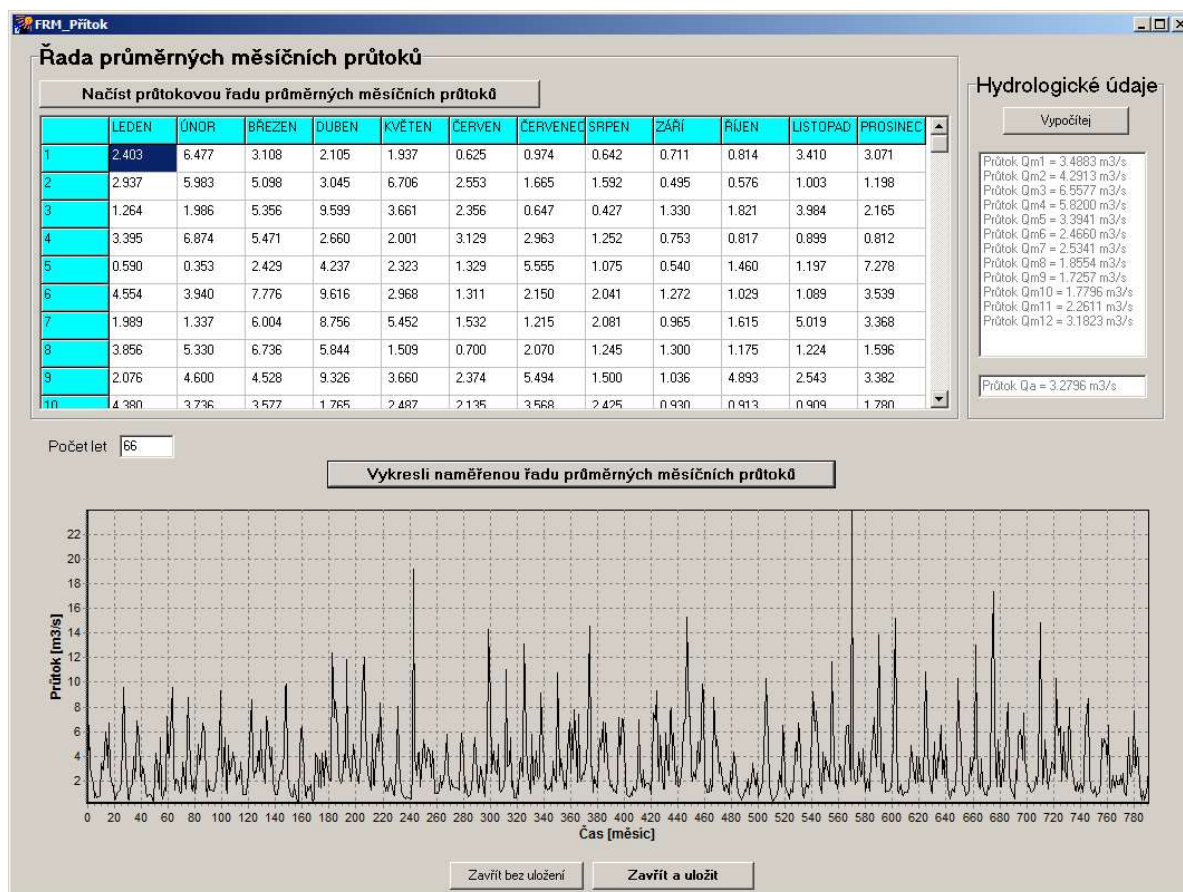
**Obr. 6** Záložky uživatelského rozhraní UNCE\_RESERVOIR

Přítoky jsou nahrávány ve formě měsíčních historických průtoků pro libovolnou délku přítokové řady. Tyto přítoky se načítají z předem upraveného textového souboru. Zároveň se v dialogovém okně Přítoky dají spočítat průměrné měsíční přítoky nahrané řady a dlouhodobý průměrný přítok vody do nádrže. Načtený průběh si může uživatel vykreslit.

#### POZNÁMKA:

Pro ukázkou vstupních dat posloužila vodní nádrž Vír I a hlásný profil Dalečín.

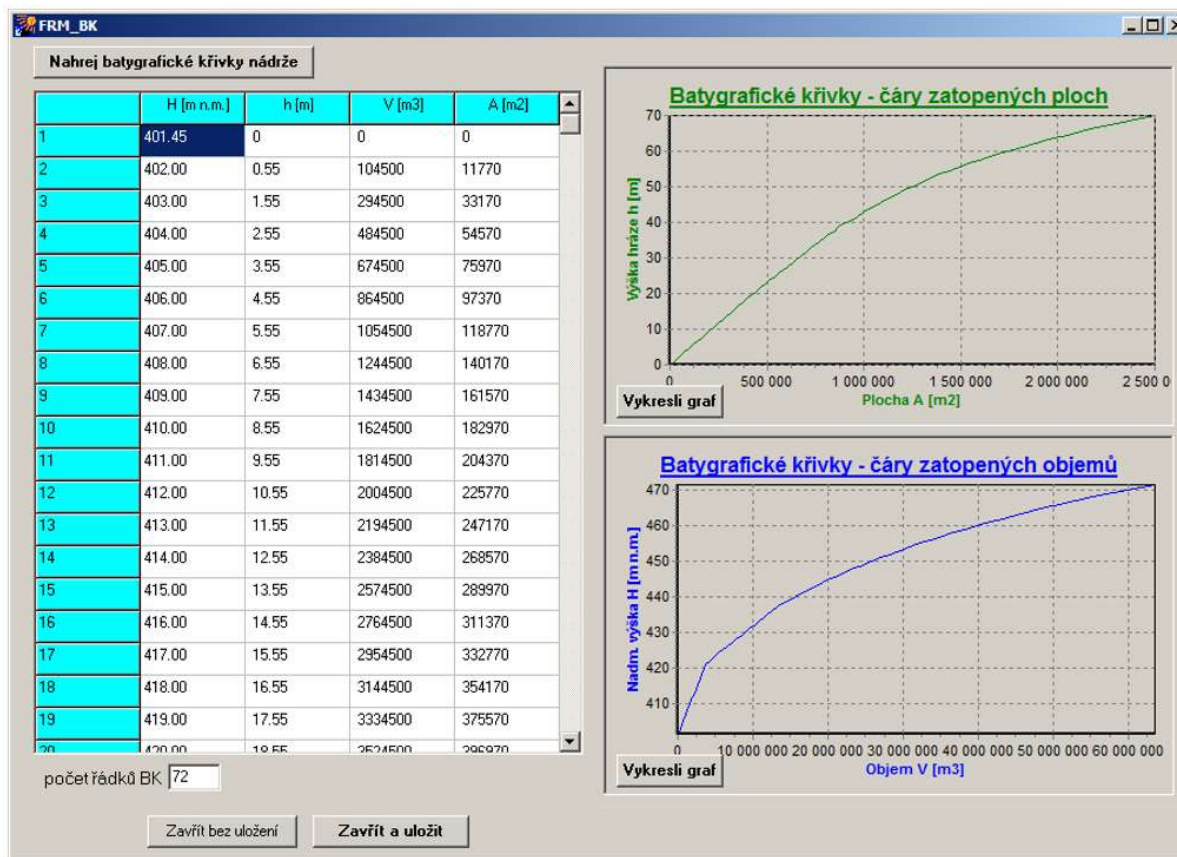
Dialogové okno s konkrétními přítoky historických měsíčních průtoků za dobu 66 let můžeme vidět na Obr. 7.



**Obr. 7** Dialogové okno pro načtení a vykreslení přítoků vody do nádrže

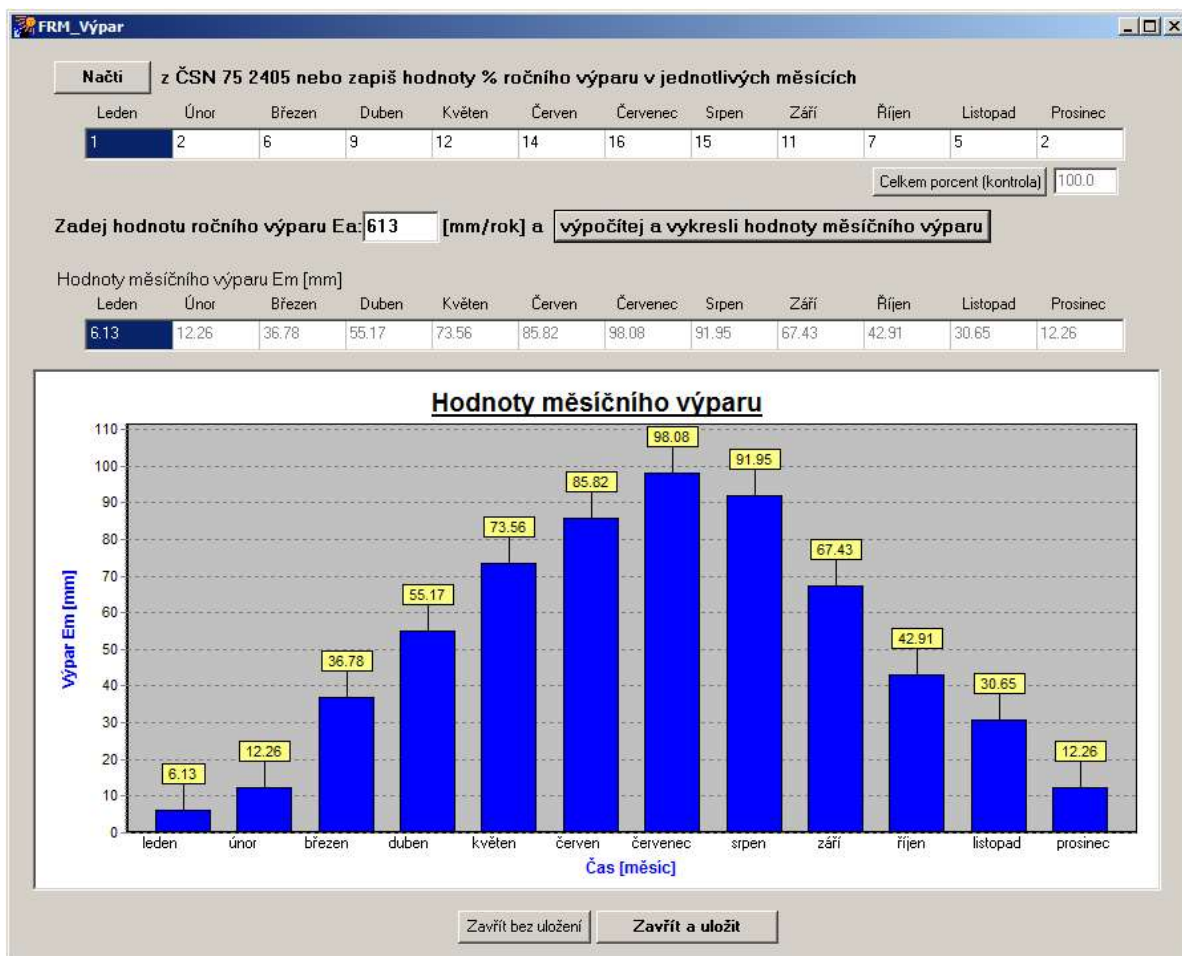
Batygrafické křivky se načítají opět z textového souboru, který je tvořen maticí o 4 sloupcích a počtem řádků, který je tvořen počtem batygrafických bodů. V prvním sloupci jsou hodnoty nadmořských výšek  $H$  [m n. m.], ve druhém hodnoty výšek ode dna nádrže  $h$  [m],

ve třetím hodnoty objemu vody v nádrži  $V$  pro jednotlivé výšky  $[m^3]$  a ve čtvrtém hodnoty ploch zátopy  $A$  pro jednotlivé výšky  $[m^2]$ . Načtené průběhy čáry zatopených ploch a čáry zatopených objemů si může uživatel pro kontrolu vykreslit. Dialogové okno s nahranými hodnotami batygrafických křivek včetně jejich vykreslení je na Obr. 8.



**Obr. 8** Dialogové okno pro načtení a vykreslení batygrafických křivek

Výpar z vodní hladiny je zadáván v podobě měsíčního výparu a uživatel jej může zadat dvěma způsoby. V lepším případě zná přímo z měření konkrétní průměrné měsíční výpary jednotlivých měsíců a rovnou je zadá do připravené tabulky. Jinak uživatel musí výpar zadat přes hodnotu průměrného ročního výparu. V tomto případě zná průměrný roční výpar buď z měření nebo tuto hodnotu přibližně odečte ze závislosti na nadmořské výšce hladiny vody dle ČSN 75 2405 (ČSN 75 2405, 2017) a poté podle stejné normy tlačítkem načte hodnoty procentuálního rozložení ročního výparu pro jednotlivé měsíce. Ukázka načtení hodnot % rozložení ročního výparu pro jednotlivé měsíce a zadání ročního výparu je na Obr. 9.



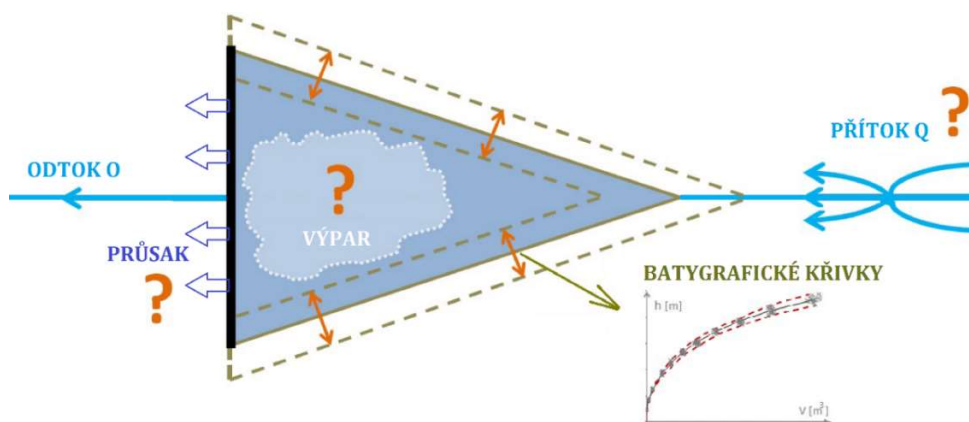
**Obr. 9** Dialogové okno pro zavedení hodnot měsíčního výparu vody z vodní hladiny

Průsak je řešen pouze pro průsak tělesem hráze. Uživatel buď přímo zadá známou hodnotu celkového průsaku z měření (manipulačního řádu nádrže) v  $[l s^{-1}]$  nebo jej orientačně vypočte na základě vyplnění hodnot rozměrů hráze a přibližné hodnoty průsaku v  $[l s^{-1}$  na  $1000 m^2]$  dle empirického pozorování. Přibližně stanovený celkový průsak tělesem hráze můžeme vidět na Obr. 10.

The screenshot shows the 'FRM\_Ostatní' dialog box. It has two main sections. The first section, 'Rozměry hráze:', contains a text field 'Zadej výšku hráze 66.2 [m]' and two more text fields 'délku hráze ve dně 200 [m]' and 'a délku hráze v hladině 390 [m]'. The second section, 'Zadej velikost průsaku:', contains a text field 'Vyplň přibližnou hodnotu průsaku dle empirického pozorování: 0.15 l/s na 1000m2' and a note '(Např. pro gravitační betonové těleso činí 0.15 l/s na 1000m2)'. Below this is a button 'Vypočítej celkový průsak tělesa' and a text field showing the result '2.92935 l/s'. At the bottom are buttons 'Zavřít okno bez uložení' and 'Uložit všechny hodnoty a zavřít okno'.

**Obr. 10** Dialogové okno pro výpočet celkového průsaku tělesem hráze

Na následujícím Obr. 11 jsou symbolicky zobrazeny vstupující veličiny do vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže v programu UNCE\_RESERVOIR, které jsou zatíženy nejistotami.



**Obr. 11** Symbolické zavedení uvažovaných veličin zatížených nejistotami

Zbývající vstupy, jako jsou hodnoty požadovaného odtoku, uvažování nejistot na vstupních datech včetně zadání konkrétní velikosti nejistoty měření, volba ztrát vody z nádrže a zbývající informace o objemech vody v nádrži jsou zadávány až dle zvoleného typu výpočtu, viz podkapitola 5.1.2 Výpočet.

#### POZNÁMKA:

Přesné názvy a cesty souborů pro načtení vstupních dat, stažení a instalace softwaru UNCE\_RESERVOIR včetně informací o hardwarovém klíči jsou dostupné na stránkách Ústavu vodního hospodářství krajiny, viz (Marton a kol., 2015d).

#### 5.1.2 Výpočet

Záložka Výpočet je tvořena třemi úlohami, a to úlohou na výpočet zásobního prostoru  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T = 100\%$ , úlohou na stanovení zabezpečení podle trvání  $P_T = f(O_P, V_Z)$  a nově úlohou na stanovení optimálního zásobního objemu nádrže  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T < 100\%$ . Na Obr. 12 můžeme vidět menu s nabídkou těchto tří úloh v programu UNCE\_RESERVOIR.



**Obr. 12** Nabídka úloh pro výpočet programu UNCE\_RESERVOIR

Pro všechny tři úlohy jsou dialogová okna pro vyplnění výpočtu velmi podobná. Po výběru jakéhokoli typu výpočtu se uživateli zobrazí dialogové okno, které musí vyplnit před samotným spuštěním výpočtu, viz Obr. 13 a Obr. 14. Velkou výhodou softwaru je, že si hned v horní části každého dialogového okna uživatel může zvolit, zda bude zadávat



požadovaný odtok vody z nádrže konstantně pro měsíce nebo různě pro celé řešené období. Dále uživatel musí zvolit ztráty vody z nádrže. Konkrétně má na výběr ztrátu výparem z vodní hladiny, ztrátu průsakem tělesa hráze nebo kombinaci těchto ztrát. Nutno podotknout, že výpočet vždy probíhá i bez ztrát vody z nádrže. Uživatel také musí vyplnit zbývající povinné informace dle typu úlohy, konkrétně objem stálého nadržení pro všechny 3 úlohy, zásobní objem nádrže při výpočtu zabezpečení a startovací zásobní objem nádrže s požadovanou zabezpečeností pro optimalizovaný zásobní objem nádrže. Nakonec si uživatel může zvolit, zda chce nebo nechce počítat s nejistotami. Při volbě výpočtu s nejistotami si dále volí počet opakování, vybírá si, na kterých vstupech chce aplikovat nejistotu a zadává konkrétní velikosti vstupních standardních nejistot typu B, které jsou značeny jako  $u_B$ . Po vyplnění všech vstupních dat a dialogového okna výpočtu teprve uživatel spustí výpočet.

Na Obr. 13 je ukázka dialogového okna výpočtu  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T = 100\%$  pro konstantní zadání požadovaného odtoku bez vstupních nejistot a na Obr. 14 je ukázka dialogového okna výpočtu  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T < 100\%$ , pro různé zadání požadovaného odtoku se vstupními nejistotami.

**ÚLOHA č. 1:  $V_Z(O_P, P=100\%)$**

Vyber jednu z možností pro zadání nalepšených (požadovaných) měsíčních odtoků  $O_P$  [m<sup>3</sup>/s] vody z nádrže: ☒ konstantně ☐ různě pro celé obd.

Zadej velikosti nalepšených měsíčních odtoků  $O_P$  [m<sup>3</sup>/s]:

Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
2.0	2.0	2.3	2.3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.3	2.3	2.0	2.0

Lze zadat konstantní nalepšený odtok  $O_P$  [m<sup>3</sup>/s] pro všechny měsíce  Přepsat

**VYPLŇ ZBÝVAJÍCÍ POVINNÉ INFORMACE**

Objem stálého nadržení nádrže  $V_{stnad.}$   [m<sup>3</sup>]

☐ Počítat s nejistotami

**Volba ztrát**

☐ ztráta výparem

☐ ztráta průsakem tělesa hráze

☒ kombinace ztrát

SPUSTIT VÝPOČET úlohy č.1 a zavřít okno

Zavřít okno bez uložení

**Obr. 13** Ukázka dialogového okna výpočtu  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T = 100\%$

**ÚLOHA č. 3: Vz(Op, P<100%)**

Vyber jednu z možností pro zadání nalepšených (požadovaných) měsíčních odtoků Op [m3/s] vody z nádrže: ☐ konstantně ☒ různě pro celé obd.

rok	LEDEN	ÚNOR	BŘEZEN	DUBEN	KVĚTEN	ČERVEN	ČERVENEC	SRPEN	ZÁŘÍ	ŘÍJEN	LISTOPAD	PROSINEC
1	2.1	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	2.45	2.3	2.3	2.2	2.1	2.1
2	2	2	2.1	2.3	2.45	2.5	2.55	2.6	2.35	2.3	2	2
3	1.8	1.9	2.3	2.3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.3	2.3	2.2	2.2
4	1.8	1.8	2.1	2.1	2.25	2.25	2.25	2.25	2.3	2.3	2	2
5	2	2	2.3	2.3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	1.9	1.9

Lze zadat konstantní nalepšený odtok Op [m3/s] pro všechny měsíce:  Zapsat do tabulky

**VYPLŇ ZBÝVAJÍCÍ POVINNÉ INFORMACE**

Objem stálého nadržení nádrže V.st.nad.  [m3]

Startovací zásobní objem nádrže Vz  [m3] (např. pro P=100%)

Požadovaná zabezpečení Pt  [%] (se ztrátami)

**Volba ztrát**

☐ ztráta výparem

☐ ztráta průsakem tělesa hráze

☒ kombinace ztrát

☒ Počítat s nejistotami ☐ po vypočtení zásobního objemu řešit i retenční prostor

Vyplň okno s nejistotami

Zadej počet opakování  (min 2 až max 899)

Lze zadat konstantní hodnotu nejistot [%] pro všechny vstupy nejistot  Přepsat všechny vstupní nejistoty

☒ Uvažovat nejistoty na přítoku vody do nádrže :

Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Konstantní nejistota měření [%] pro všechny měsíce  Přepsat

☒ Uvažovat nejistoty na batygrafických křivkách :

Konstantní nejistota na BK [%]  Přepsat

Nejistota při stanovení ploch BK [%]  Nejistota nadm. výšky při stanovení BK [%]

Nejistota při stanovení objemů BK [%]  Nejistota výšky při stanovení BK [%]

☒ Uvažovat nejistoty na výparu vody z vodní hladiny :

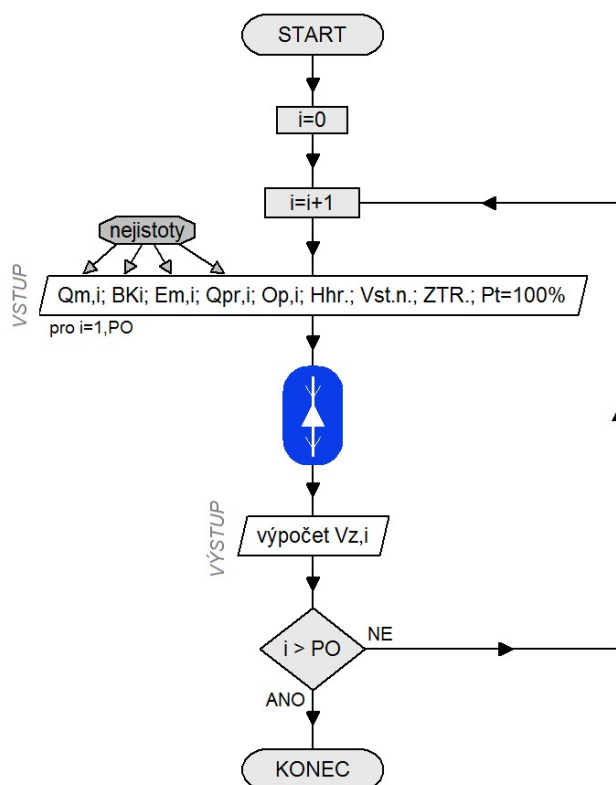
Velikost nejistoty na výparu z vodní hladiny [%]

☒ Uvažovat nejistoty na průsaku tělesem hráze

Velikost nejistoty průsakem tělesa hráze [%]

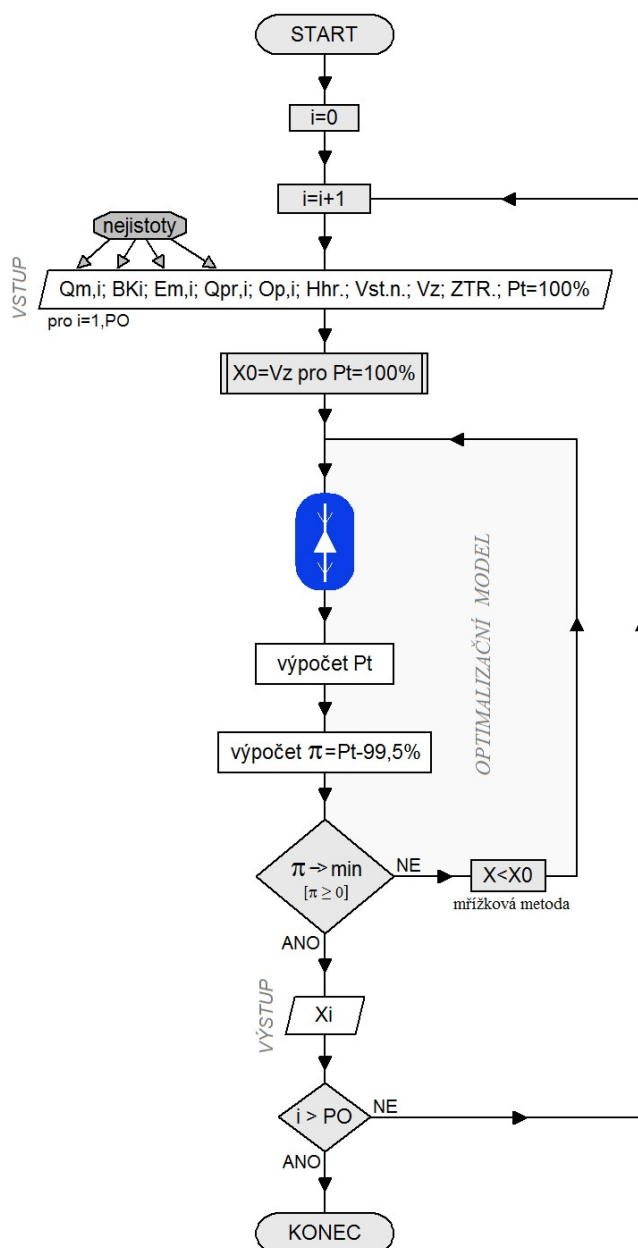
**SPUSTIT VÝPOČET úlohy č.2 a zavřít okno**

Obr. 14 Ukázka dialogového okna výpočtu  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T < 100 \%$



Obr. 15 Vývojový diagram výpočtu  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T = 100 \%$

Princip výpočtu  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T = 100 \%$  je schematicky znázorněn jednotlivými kroky algoritmu na Obr. 15. Princip výpočtu  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T < 100 \%$  (konkrétně pro významnost nádrže A, tedy optimalizaci na  $P_T = 99,5 \%$ ) je na Obr. 16.



**Obr. 16** Vývojový diagram výpočtu optimalizovaného  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T < 100 \%$

**POZNÁMKA:**

Software UNCE\_RESERVOIR je naprogramován i na úlohu pro stanovení zabezpečení  $P$ , kdy zabezpečení  $P$  je funkcí požadovaného odtoku  $O_P$  a zásobního objemu  $V_Z$ , tedy  $P = f(O_P, V_Z)$ . Tato úloha byla již podrobněji řešena školitelem např. v (Marton a kol, 2015a) nebo diplomovou prací autora (Paseka, 2016) a proto není podrobněji popsána ani řešena v této disertační práci.

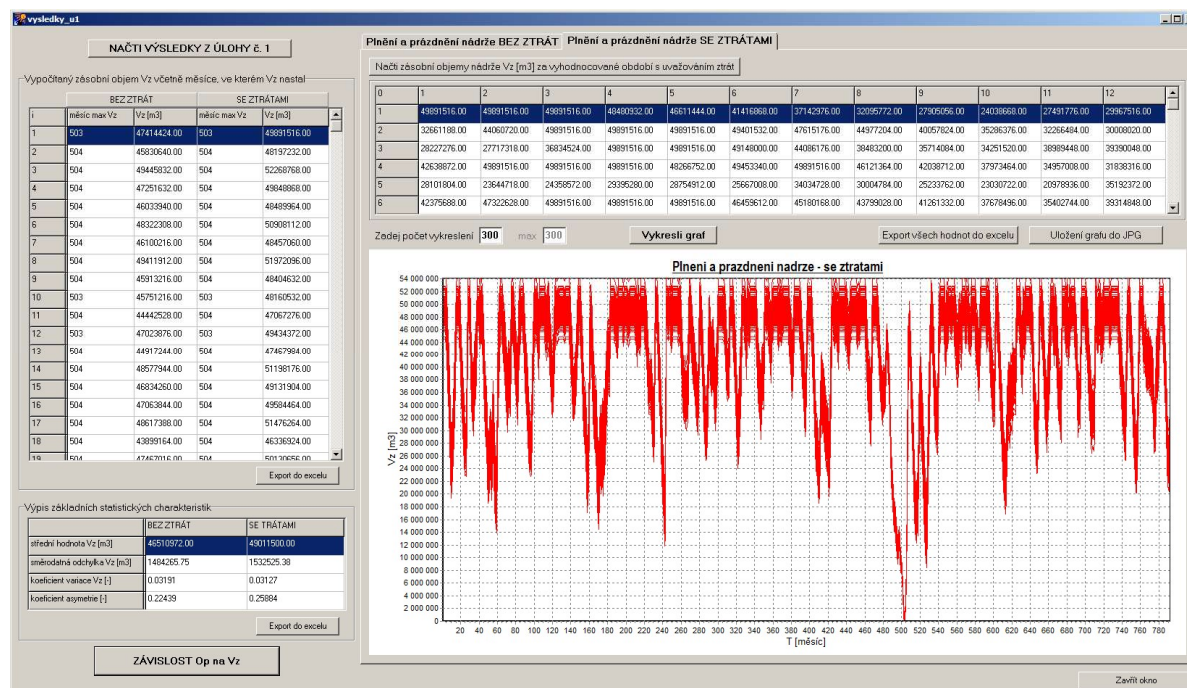


Optimalizace je v optimalizačním modelu provedena mřížkovou metodou. Vstupním parametrem  $X_0$  je hodnota  $V_Z$  pro  $P_T = 100\%$ . Pro urychlení výpočtu byly při snižování parametru  $X$  voleny 4 kroky parametru (4 rozlišovací úrovně). Kritérium  $\pi$ , které je minimalizováno, se určí z aktuálně vypočtené zabezpečenosti podle trvání, od kterého se odečte příslušná zabezpečenost, v tomto případě tedy 99,5 %. Abychom zajistili alespoň právě zabezpečenost 99,5 %, tak kritérium  $\pi$  musí být  $\geq 0$ .

### 5.1.3 Výsledky

Záložka Výsledky je stejně jako záložka Výpočet rozdělena na tři typy úloh. Podle zvoleného typu úlohy si uživatel může vpsat tabelární výsledky vždy bez ztrát a se ztrátami vody z nádrže pro všechna opakování. Zároveň se vypíší ihned výsledky základních statistických charakteristik a načtou se všechny měsíční zásobní objemy nádrže za celé vyhodnocené období, které si uživatel může zároveň vykreslit pro libovolný počet průběhů. Vykreslené průběhy si uživatel může různě přibližovat a ukládat do formátu JPG. Výhodou softwaru také je, že všechny dosažené výsledky mohou být rovnou exportovány do excelu pro případnou další práci s dosaženými výsledky.

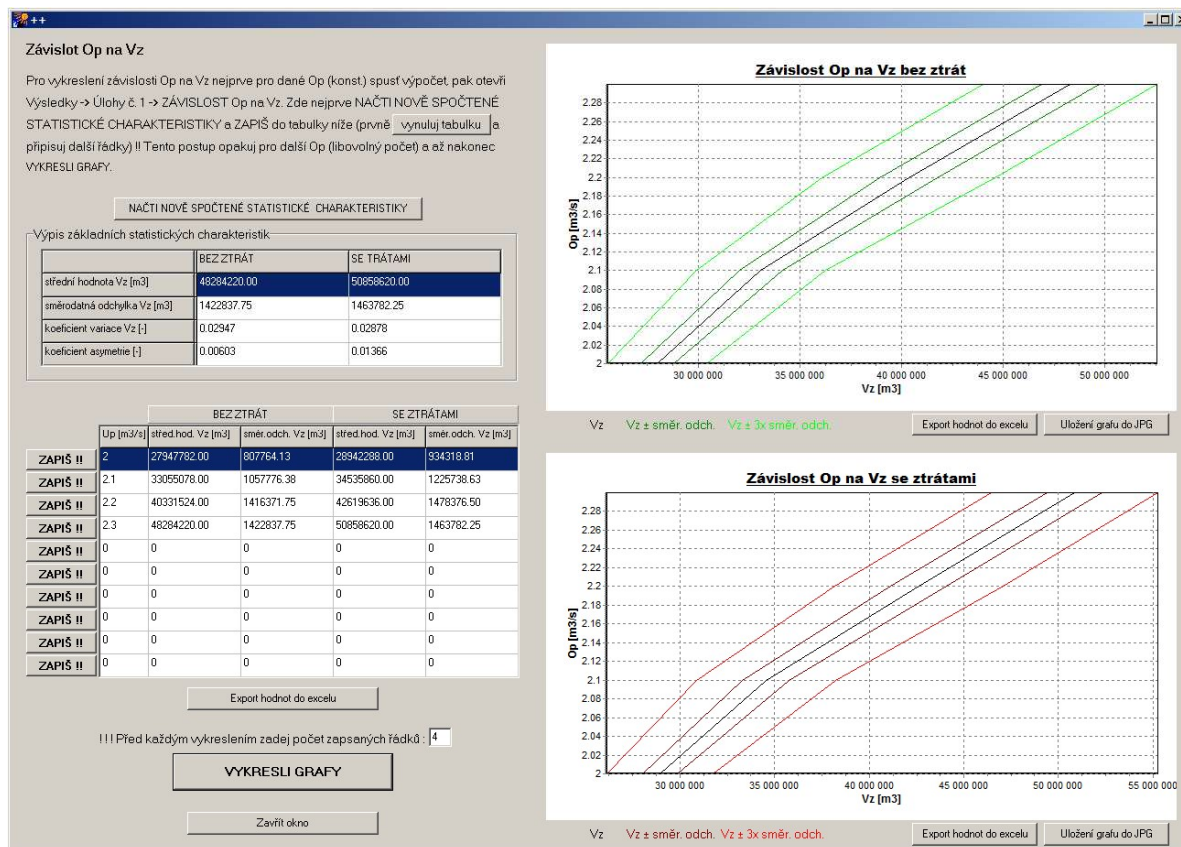
Ukázka dialogového okna výsledku pro úlohu  $V_Z = f(OP, P_T)$  pro  $P_T = 100\%$  je na Obr. 17. V levé části okna jsou finální výsledky zásobních objemů pro všechna opakování včetně měsíce, ve kterém nastalo maximální vyprázdnění nádrže.



**Obr. 17** Ukázka dialogového okna výsledky  $V_Z = f(OP, P_T)$  pro  $P_T = 100\%$

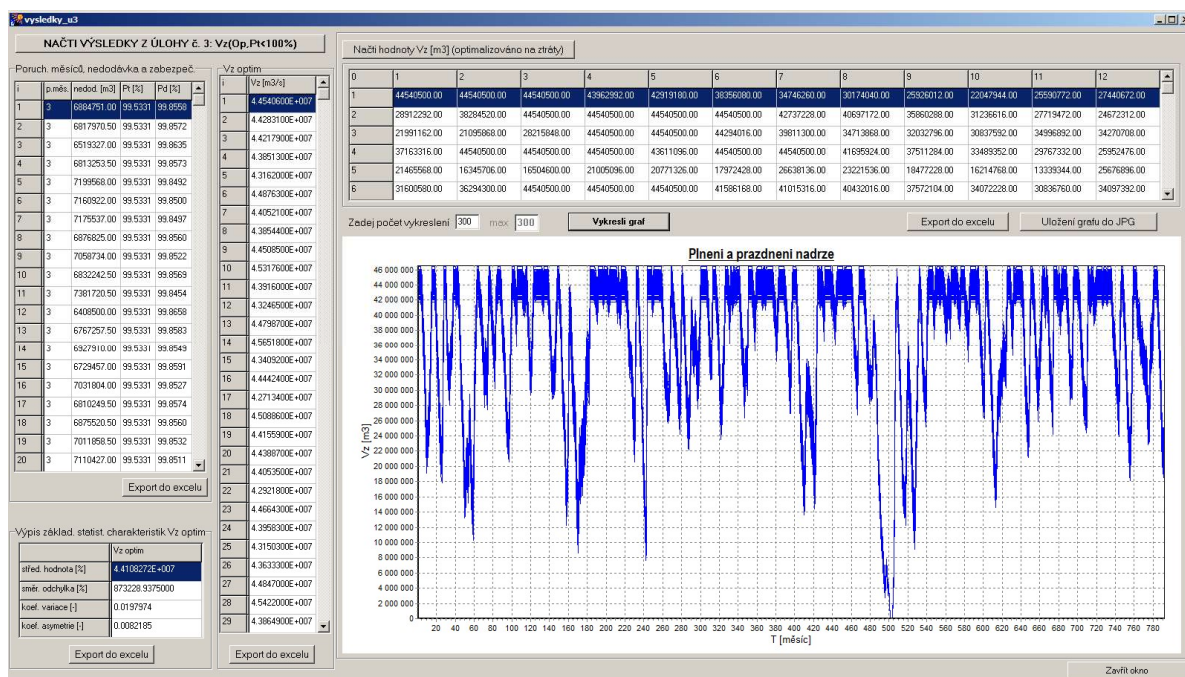
V levém dolním rohu na Obr. 17 je tlačítko na otevření nového dialogového okna Závislost  $OP$  na  $V_Z$ . Pro vykreslení této závislosti musí uživatel vždy nejprve spustit výpočet pro dané

$O_P$  a kliknutím v tomto okně, viz Obr 18, zapsat výsledek spočtených statistických charakteristik a až poté zapsat výsledek do řádku. Tento postup (spuštění a zapsání výsledků) se opakuje pro další  $O_P$  (libovolný počet) a nakonec se vykreslí závislost  $O_P$  na  $V_Z$  jak bez ztrát, tak se ztrátami vody z nádrže včetně průběhů s koeficienty rozšíření  $k = 1,0$  a  $k = 3,0$  neboli  $V_Z \pm \sigma(x)$  a  $V_Z \pm 3\sigma(x)$ . Příklad zapsaných výsledků pro několik  $O_P$  a vykreslené průběhy závislosti  $O_P$  na  $V_Z$  jsou na Obr. 18.



**Obr. 18** Ukázka dialogového okna závislosti  $O_P$  na  $V_Z$  pro úlohu  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T = 100 \%$

Ukázka dialogového okna výsledky pro úlohu  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T < 100 \%$  je včetně načtených a vykreslených výsledků na Obr. 19.



**Obr. 19** Ukázka dialogového okna výsledky  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T < 100\%$

V levé části okna můžeme vidět v první tabulce sloupce s výsledným počtem poruchových měsíců, celkovou nedodávku vody v  $[m^3]$ , zabezpečenosť podle trvání  $P_T$  a zabezpečenosť podle nedodané vody  $P_D$ . V další tabulce jsou výsledné optimalizované zásobní objemy pro všechna opakování. V této úloze, ve které probíhá optimalizace, je výpočet prováděn pouze se ztrátami vody z nádrže.

## 5.2 TRANSFORM\_WAVE

Pro stanovení retenčního prostoru v podmínkách nejistot byl vytvořen software TRANSFORM\_WAVE. Knihovna softwaru byla výstupem specifického juniorského projektu FAST-J-18-5044 „Návrh retenčního prostoru nádrže v podmínkách nejistot“ jejímž hlavním řešitelem je autor práce. Program TRANSFORM\_WAVE transformuje povodňovou vlnu na principu modifikování grafické Klemešovy metody. Grafická Klemešova metoda byla zmatematizována v programovacím jazyce FORTRAN (FORTRAN 77, 2019a) a (FORTRAN 77, 2019b).

Při výpočtu neboli transformaci povodňové vlny v čase lze provádět manipulace se spodními výpustěmi, a to i s plynulou manipulací k postupnému zavírání a otvírání spodních výpustí. Plynulá manipulace je na principu optimalizace mřížkovou metodou a slouží k optimálnímu přivírání spodních výpustí při překročení bezpečnostního přelivu na začátku povodně a po opadnutí povodně zase k postupnému otvírání za účelem lepší transformace. Manipulace je prováděna s citlivostí 1/20 otevření - zavření spodních výpustí. Jinými slovy je vypočteno

21 transformačních čar povodně. Při plynulé manipulaci je provedena optimalizace otevření – zavření spodních výpustí na velikost neškodného odtoku  $Q_{NE}$ .

**POZNÁMKA:**

První výsledky softwaru byly v rámci vývoje ověřeny a porovnány s programem HYDROG (Starý, 1991-2019), který pro transformaci využívá metodu Runge – Kutta 4. řádu. Transformace při deterministickém řešení byly v porovnání téměř identické.

Software TRANSFORM\_WAVE byl dále vybaven odpovídajícím grafickým uživatelským rozhraním v programu Delphi 7 (Borland Delphi Enterprise, Version 7.0, 2002). Uživatel opět může jednoduše zadávat vstupy, nastavovat a provádět výpočty a také přehledně zobrazovat výstupy. Software byl taktéž testován v rámci specifického juniorského projektu FAST-J-18-5044 a některé výsledky autorů jsou rovněž uvedeny v současném stavu poznání.

Po otevření aplikace uživatelského rozhraní TRANSFORM\_WAVE jsou obdobně jako v uživatelském rozhraní softwaru UNCE\_RESERVOIR na hlavní liště záložky Vstupy, Výpočet a Výsledky. Práce s těmito záložkami je podrobněji popsána v následujících podkapitolách.

### 5.2.1 Vstupy

Vstupy jsou tvořeny záložkami Povodňová vlna, Batygrafické křivky a Technické údaje, viz Obr. 20. Nahrání všech vstupních dat do programu TRANSFORM\_WAVE je popsáno dále.



**Obr. 20** Záložky uživatelského rozhraní TRANSFORM\_WAVE

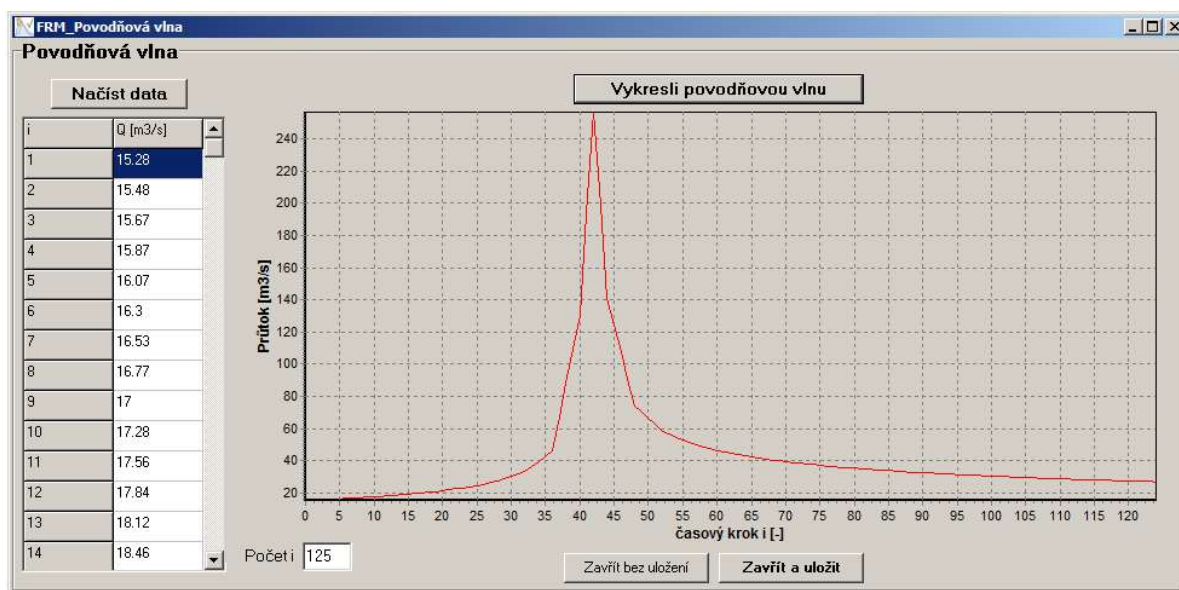
Povodňová vlna neboli přítok vody do nádrže je nahrávána ve formě řady bodů povodňové vlny o libovolné délce a časového kroku  $\Delta t$ , podmínkou však je, že  $\Delta t$  musí být v celé řadě stejný. Povodňová vlna se načítá z předem upraveného textového souboru.

**POZNÁMKA:**

Pro ukázkou vstupních dat posloužila opět vodní nádrž Vír I a hlásný profil Dalečín.

V dialogovém okně Povodňová vlna je možno po načtení dat vykreslit její průběh. Dialogové okno s načtenou a vykreslenou povodňovou vlnou  $Q_{1.000}$  můžeme vidět na Obr. 21.





**Obr. 21** Ukázka načtené a vykreslené povodňové vlny

Batygrafické křivky se načítají opět z textového souboru o 4 sloupcích stejně jako v programu UNCE\_RESERVOIR. Dialogové okno načtených a vykreslených průběhů čar zatopených ploch a zatopených objemů je ukázán na Obr. 8.

Dialogové okno s technickými údaji nádrže obsahuje specifikace spodních výpustí a nehrazeného přelivu. Kdy parametry spodních výpustí se zadávají počtem výpustí, průměrem a součinitelem výtokové rychlosti dle typu spodních výpustí. Nehrazený bezpečnostní přeliv je definován skutečnou šířkou a součinitelem přepadu. Dalšími nezbytnými údaji pro výpočet jsou výška hladiny po zásobní prostor, výška hladiny po bezpečnostní přeliv a výška maximálního dosahu povodně, viz Obr. 22.

#### POZNÁMKA:

Software UNCE\_RESERVOIR prozatím umožňuje výpočet pouze pro nehrazený typ bezpečnostního přelivu.

Při řešení musí být u maximální výšky dosahu povodně dostatečná kapacita batygrafických křivek. Po překročení max. dosahu povodně je výpočet ukončen s hláškou přelití nádrže. Při výpočtech byla tato výška volena výše než samotná výška hráze, aby byl výpočet dokončen pro všechna opakování a následně byl vyhodnocen počet přelití hráze.

**FRM\_Technické údaje**

**Spodní výpusti**

Počet spodních výpustí:

Průměr potrubí [m]:

Součinitel výtokové rychlosti [-]:

**Bezpečnostní přeliv**

Skutečná šířka b0 [m]:

Součinitel přepadu m [-]:

Kóta výšky vody po zásobní prostor od dna nádrže (začátek RO) [m]:  ☒ zadávám ručně (ne z UR)

Kóta výšky vody po bezpečnostní přeliv od dna nádrže (začátek RN) [m]:

Kóta výšky retenčního neovladatelného prostoru od dna nádrže [m]:   
 (Resp. maximální výška dosahu povodně. Pozor na kapacitu BKI)

**Obr. 22** Dialogové okno vstupních údajů spodních výpustí a bezpečnostního přelivu

Zbývajících vstupů jsou možnosti manipulace se spodními výpustěmi, neškodný odtok, startovací výška hladiny vody v nádrži a časový krok výpočtu (časový krok povodňové vlny  $\Delta t$ ). Uvažování nejistot na vstupních datech včetně zadání konkrétní velikosti nejistoty měření a počtu opakování, jsou vkládány až v záložce Výpočet.

#### POZNÁMKA:

Přesné názvy a cesty souborů pro načtení vstupních dat, stažení a instalace softwaru TRANSFORM\_WAVE včetně informací o hardwarovém klíči jsou dostupné na stránkách Ústavu vodního hospodářství krajiny (Paseka a Marton, 2020).

#### 5.2.2 Výpočet

Po výběru tlačítka Výpočet se zobrazí dialogové okno, které musí být vyplněno před samotným spuštěním výpočtu, viz Obr. 23. Nejprve se musí zvolit manipulace spodními výpustěmi pro hladinu vody v zásobním prostoru, v retenčním prostoru ovladatelném, po povodni a při překročení bezpečnostního přelivu (v retenčním prostoru neovladatelném). Pro první případy lze v každém prostoru zvlášť volit mezi variantami zavřené, plně otevřené, otevřené na  $Q_{NE}$  a otevřené na  $Q$ . Pouze při překročení bezpečnostního přelivu je možnost mít výpusti otevřené nebo zavřené (buď v této poloze zůstanou, nebo proběhne manipulace v 1 časovém kroku – pozor na krok výpočtu  $\Delta t$  a typ spodních výpustí). Podle manipulačních řádů nádrží se při povodních, kdy hladina vody

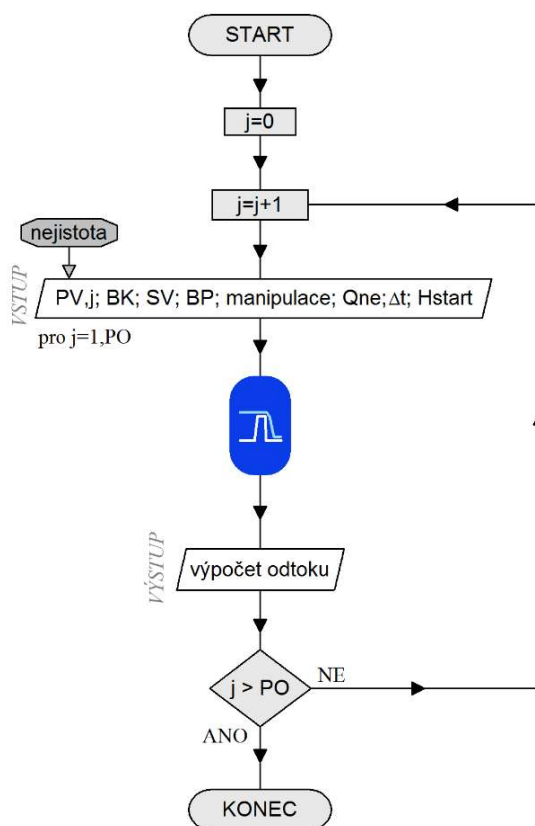
vystoupá nad kótu bezpečnostního přelivu, nedoporučuje nechávat spodní výpusti otevřené. Další volbou softwaru při překročení bezpečnostního přelivu je plynulá manipulace, kdy při povodni mohou být spodní výpusti plynule zavírány a po povodni plynule otvírány. V tomto případě se ještě volí, po jakou výšku nad přelivem může probíhat plynulá manipulace. U velkých vodních děl je tato hodnota většinou uvedena v manipulačním řádu nádrže. Také musí být vyplněna konkrétní hodnota  $Q_{NE}$ .

Dále musí být nastaveny počáteční podmínky výpočtu v podobě startovací výšky vody v nádrži a časového kroku výpočtu odpovídajícímu časovému kroku  $\Delta t$  povodňové vlny. Nakonec je možné zvolit, zda se bude nebo nebude při výpočtu uvažovat s nejistotami hydrogramu povodně. Při volbě výpočtu s nejistotami, které jsou v tomto případě aplikovány pouze na povodňovou vlnu, se dále volí počet opakování a konkrétní velikost vstupní standardní nejistoty typu B na povodňové vlně. Po vyplnění všech vstupních parametrů dialogového okna výpočtu, viz Obr. 23, je možno spustit výpočet.

**Obr. 23** Ukázka dialogového okna výpočtu transformace povodňové vlny

Výpočet vždy probíhá deterministicky a při zvolení nejistot povodňových vln i stochasticky. Nejprve jsou vygenerované náhodné průběhy povodňových vln, které slouží jako vstupní hodnoty do opakovaných řešení. Výsledkem opakovaných výpočtů jsou potom spektra průběhů transformovaných povodňových vln a spektra dosažených výšek vody v nádrži, respektive velikosti retenčního prostoru.

Princip výpočtu opakovaných transformací povodňových vln je schematicky znázorněn jednotlivými kroky vývojového diagramu na Obr. 24.

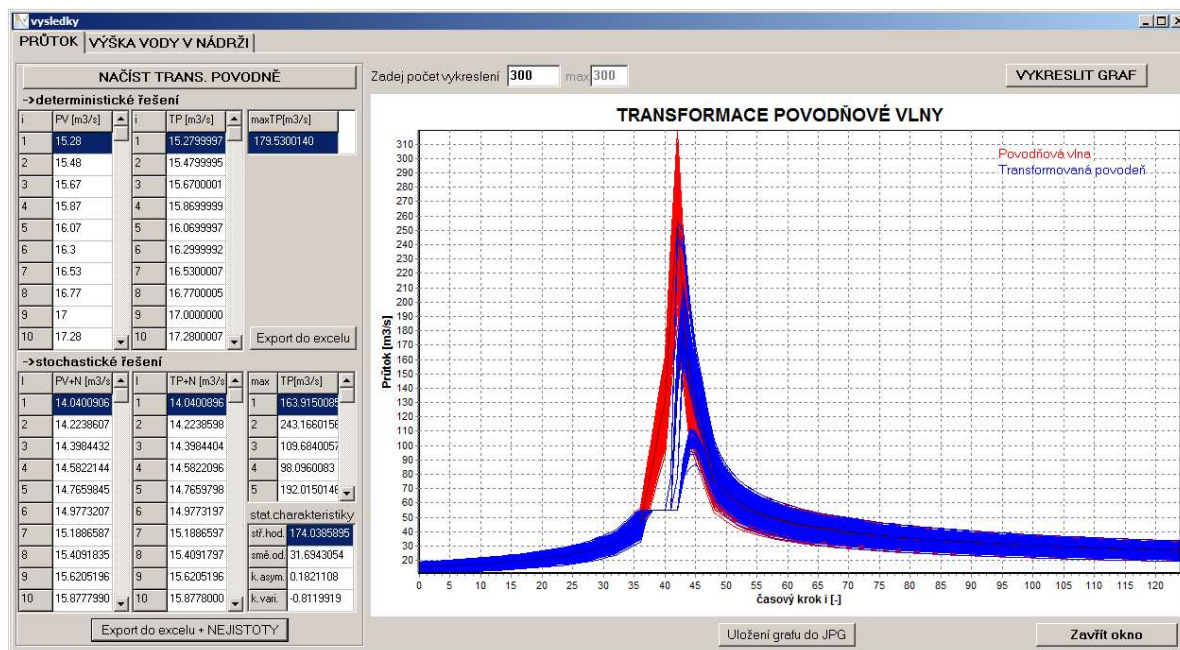


**Obr. 24** Vývojový diagram výpočtu transformace povodňové vlny

### 5.2.3 Výsledky

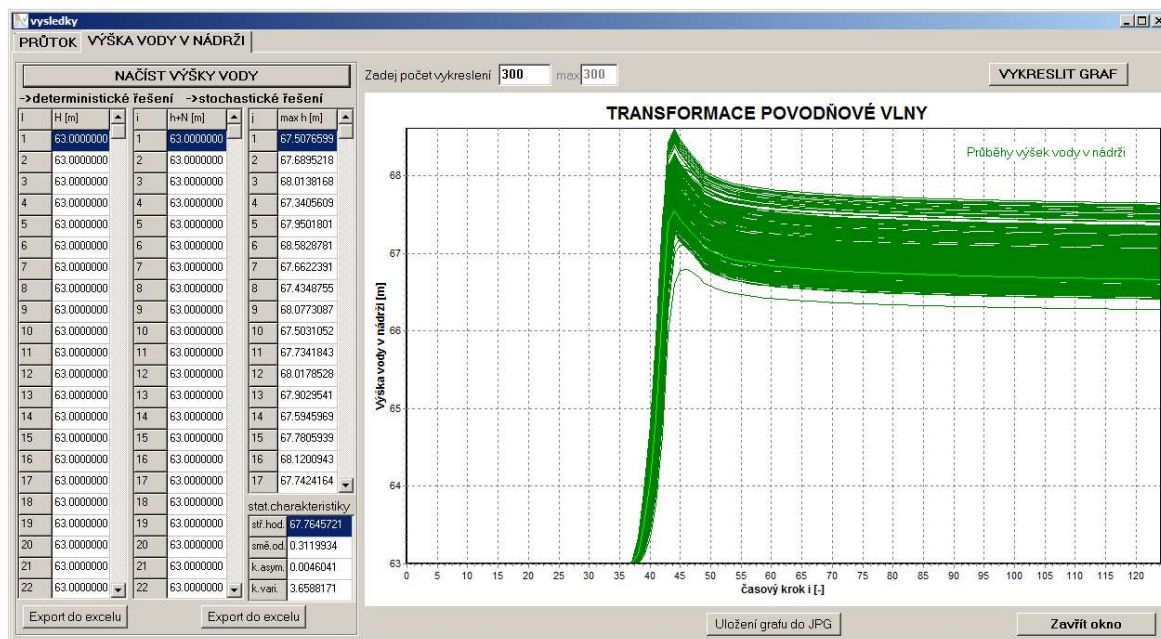
V dialogovém okně Výsledky lze vypsát tabelární výsledky deterministických a stochastických výsledků transformovaných povodní, viz Obr. 25 a dosažených výšek vody v nádrži, viz Obr. 26. Dále jejich dosažená maxima v každém opakování a výsledky vybraných statistických charakteristik. Průběhy transformovaných povodní a průběhy výšek vody v nádrži lze vykreslit pro libovolný počet průběhů. Vykreslené průběhy je možné různě přibližovat a ukládat do JPG. Výhodou softwaru opět je, že všechny dosažené výsledky mohou být rovnou exportovány do excelu pro případnou další práci s dosaženými výsledky.





**Obr. 25** Ukázka dialogového okna výsledky s vykreslenými průběhy transformovaných povodní

V levé části okna výsledky na Obr. 25 jsou nejprve vidět tabelární hodnoty se vstupní povodňovou vlnou a výsledky transformované povodně včetně její kulminace pro deterministické řešení, tedy bez nejistot. Pod těmito hodnotami jsou sloupce s generovanými povodňovými vlnami, výsledky transformací a jednotlivé kulminace pro všechna opakování stochastického řešení, tedy s nejistotami. Nakonec je zde tabulka se statistickými charakteristikami kulminací transformovaných povodní. V pravé části okna jsou vykresleny jednotlivé průběhy generovaných povodňových vln a průběhy výsledných transformací.



**Obr. 26** Ukázka dialogového okna výsledky s vykreslenými průběhy výšek vody v nádrži

V levé části okna výsledky na Obr. 26 je nejprve sloupec průběhu výšek deterministického řešení, vedle jsou průběhy výšek stochastického řešení včetně dosažených kulminací pro všechna opakování. Taktéž je zde tabulka se statistickými charakteristikami dosažených kulminací výšek vody v nádrži. V pravé části okna jsou vykresleny jednotlivé průběhy dosažených výšek. Odlišnými odstíny jsou na Obr. 25 a Obr. 26 vykresleny deterministické průběhy během transformace povodňové vlny neovlivněné nejistotou.

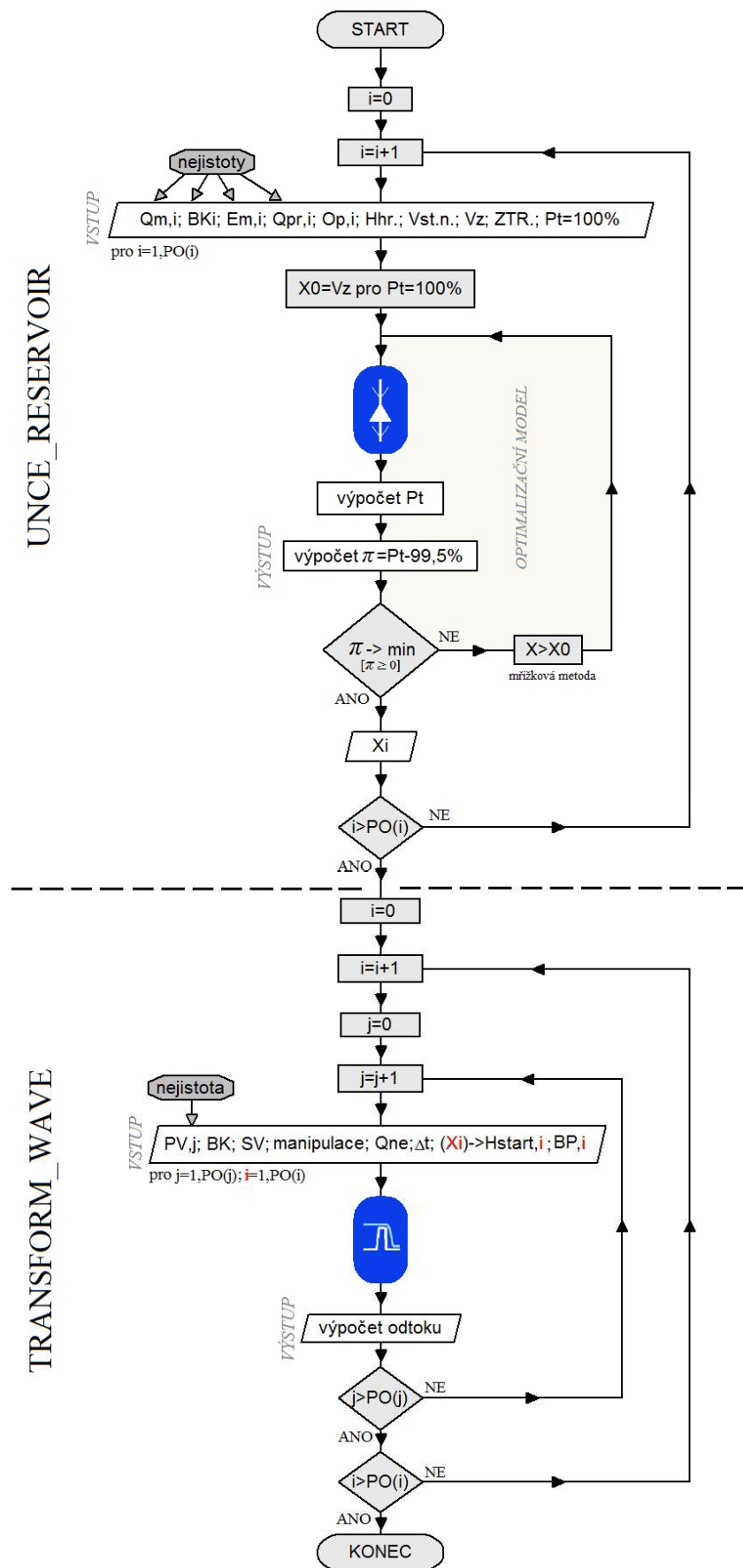
### 5.3 Propojení UNCE\_RESERVOIR a TRANSFORM\_WAVE

Pro komplexní stanovení zásobního a retenčního objemu nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat musí být oba prostory řešeny integrovaně, tedy propojením dvou výše popsaných softwarů UNCE\_RESERVOIR a TRANSFORM\_WAVE. Nejprve se musí spustit program UNCE\_RESERVOIR a vypočítat optimalizovaný zásobní objem nádrže v podmínkách nejistot na základě vstupních dat. Při vyplnění dialogového okna Výpočet, viz Obr. 14, musí být zároveň zaškrtnuto tlačítko: *po vypočtení zásobního objemu řešit i retenční prostor*. Po dokončení výpočtu zásobního objemu se automaticky spustí software TRANSFORM\_WAVE, kde se opět musí vyplnit všechny vstupy před samotným výpočtem transformace povodňové vlny. Nyní v dialogovém okně Technické údaje, viz Obr. 22, musí být odškrtnuta volba u zadávání výšky zásobního prostoru nádrže tlačítkem: *zadávám ručně (ne z UR)*. V tomto případě se automaticky přepočítá vypočtený optimalizovaný zásobní objem nádrže [m<sup>3</sup>] na danou výšku zásobního prostoru [m] pro všechna opakování  $PO_{(i)}$  optimalizovaného  $V_Z$ . Dále v dialogovém okně Výpočet transformace povodňové vlny, viz Obr. 23, lze zvolit, zda výšku vody z nádrže na začátku povodňové vlny zadat ručně konstantní výškou pro všechna opakování transformace povodňové vlny  $PO_{(j)}$  nebo odškrtnutím tlačítka: *start zadávám ručně (ne z UR)* a automaticky startovat na vypočtených optimalizovaných zásobních objemech. Nakonec uživatel musí před samotným výpočtem transformací odškrtnout volbu *počítám pouze transformaci (ne z UR)*. Implementace nastavení pro řešení obou prostorů současně je pomocí výstřižků z obou softwarů ukázáno na Obr. 27.

<input checked="" type="checkbox"/> <b>po vypočtení zásobního objemu řešit i retenční prostor</b>	
Kóta výšky vody po zásobní prostor od dna nádrže (začátek RO) [m]:	<input type="checkbox"/> zadávám ručně (ne z UR)
<b>Nastavení výpočtu</b>	<input type="checkbox"/> start zadávám ručně (ne z UR) <input type="checkbox"/> počítám pouze transformaci (ne z UR)
Výška vody v nádrži na začátku řešení (start)	[m]

**Obr. 27** Volba zadávání v softwarech pro komplexní stanovení funkčních objemů nádrže

Na Obr. 28 je zobrazen vývojový diagram komplexního řešení funkčních objemů nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat. Je vidět, že jsou nejprve stanoveny optimalizované  $V_{Zi}$  z nichž jsou stanoveny vstupy do transformací. Celkový počet opakování je  $PO_{(i)} \times PO_{(j)}$ .



Obr. 28 Vývojový diagram komplexního řešení funkčních objemů nádrže



## 6 PRAKTICKÁ APLIKACE

Vytvořené a výše popsané softwary byly testované na vybraných nádržích spadajících do Povodí Moravy, s. p. Konkrétně na vodních dílech Vranov, Vír, Brno, Mostiště, Karolinka a Hubenov. U těchto nádrží byly aplikovány nejistoty měření do vodohospodářského řešení.

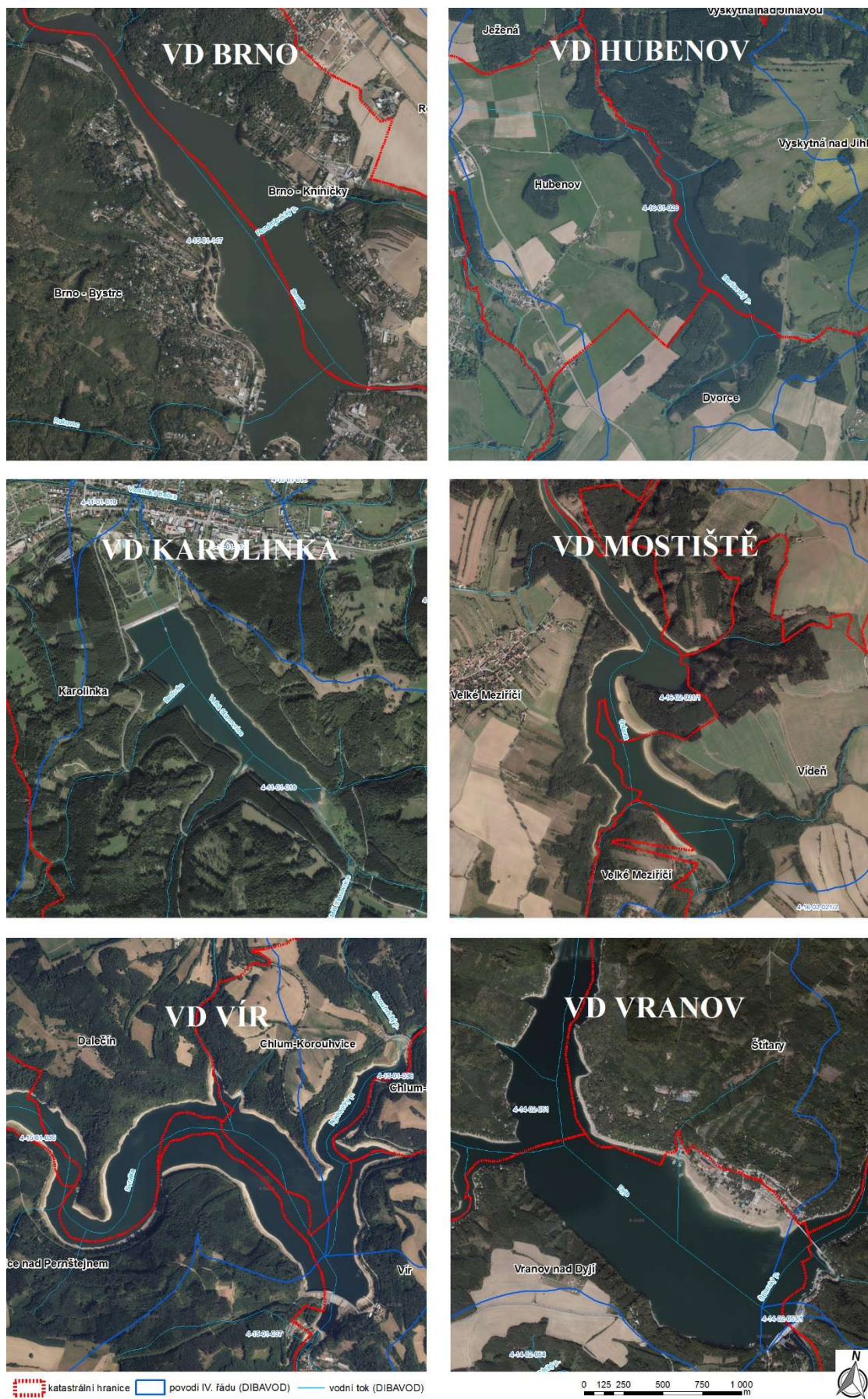
Na Obr. 29 je mapa schematicky vybraných vodních děl. Konkrétní profily byly vybrány z důvodu dostupnosti dat a manipulačních řádů, které byly k dispozici. VD Vír I a VD Brno jsou na řece Svatce, VD Vranov na řece Dyji, VD Mostiště na řece Oslavě, VD Hubenov na Maršovském potoku a VD Karolinka na Velké Stanovnici.



**Obr. 29** Vybraná vodní díla ve správě Povodí Moravy, s.p. (mapy.cz)

Na Obr. 30 jsou detailní ortofotomapy vybraných vodních děl. Červeně jsou v mapách značeny katastrální hranice, tmavě modře povodí IV. řádu a světle modře vodní toky dle digitální báze vodohospodářských děl. Tyto detailní ortofotomapy byly vytvořeny v programu ArcMap (ESRI® ArcMap<sup>TM</sup> 10.0, 2019).





**Obr. 30** Vybraná vodní díla – detail

V Tab. 2 jsou uvedeny podrobné údaje ke každému vodnímu dílu podle manipulačních řádů (Manipulační řád VD Brno, 2008), (Manipulační řád VD Hubenov, 2009), (Manipulační řád VD Karolínka, 2014), (Manipulační řád VD Mostiště, 2013), (Manipulační řád VD Vír, 2011) a (Manipulační řád VD Vranov, 2011).

**Tab. 2** Potřebné informace vybraných vodních děl

	BRNO	HUBENOV	KAROLINKA	MOSTIŠTĚ	VÍR	VRANOV
min. průtok $minQ$ [ $m^3s^{-1}$ ]	1.37	0.013	0.03	0.12	0.53	1.00
požadov. odtok $O_P$ [ $m^3s^{-1}$ ] **	2.4	0.14-0.16 (*)	0.25	0.42	2.5	4-8 (*)
neškodný odtok $Q_{NE}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	155	7	25	15	55	130 (200)
dlouhodobý průtok $Q_A$ [ $m^3s^{-1}$ ]	7.95	0.393	0.36	1.425	3.607	9.47
<b>dloh. průtok <math>Q_a</math> [<math>m^3s^{-1}</math>] z dat</b>	<b>7.947</b>	<b>0.409</b>	<b>0.379</b>	<b>1.365</b>	<b>3.28</b>	<b>9.857</b>
délka řady $Q_m$ (počet let)***	90	96	86	64	66	81
výpar [mm/rok]	705	597	600	608	613	650
objem $V_{ST.N.}$ [mil. $m^3$ ]	2.082	0.480	0.929	1.045	3.800	31.840
<b>objem zásobní <math>V_z</math> [mil. <math>m^3</math>]</b>	<b>13.020</b>	<b>2.395</b>	<b>5.813</b>	<b>9.339</b>	<b>44.056</b>	<b>79.670</b>
objem retenční $V_{RO}$ [mil. $m^3$ ]	0.000	0.000	0.000	0.609	5.286	11.160
objem retenční $V_{RN}$ [mil. $m^3$ ]	2.600	0.320	0.654	0.944	3.051	10.030
<b>celkový objem nádrže <math>V_{celk}</math></b>	<b>17.702</b>	<b>3.195</b>	<b>7.395</b>	<b>11.937</b>	<b>56.193</b>	<b>132.700</b>
$Q_{100}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	335	23	87.4	82	166	435
<b><math>Q_{1.000}</math> [<math>m^3s^{-1}</math>]</b>	<b>510</b>	<b>44</b>	<b>118</b>	<b>138</b>	<b>256.7</b>	<b>802</b>
$Q_{10.000}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	641	-	143	182	369.5	1374
délka hráze v koruně [m]	120	341	391.5	292	390	290.45
výška hráze [m]	34.5	19	35.5	28.7	66.2	47
dno nádrže [m n.m.]	211	505	485	438	401.45	306.75
počet řádků BK z dat	41	35	83	64	72	26
průsak hráze [ $l s^{-1}$ ]	0.15	8	5	5	2.9	1.7
typ tělesa hráze	betonová gravitační	sypaná zemní	sypaná zemní	kamenitá	betonová tížní	betonová gravitační
typ bezpečnostního přelivu	hrazený	šachtový	šachtový	pevný	korunový nehrazený	nehrazená přepad. pole
spodní výpusti [mm]	1 x 2000	2 x 600	2 x 800	1 x 1100	2 x 1800	4 x 1600
manipulační řád z roku	2008	2009	2014	2013	2011	2011

\* proměnný odtok podle regulačních stupňů

\*\* pro  $P_T = 100$  %

\*\*\* měsíční průtoky do roku 2016

Jak plyne z Tab. 2 výše, tak pro tyto profily byly dostupné řady průměrných měsíčních průtoků až po rok 2016 včetně. Tyto aktualizované řady průtokových řad tak dobře postihují charakter posledních let, kdy jsme začali zaznamenávat suché roky.

Kapitola 6 Praktická aplikace je rozdělena do 4 podkapitol: 6.1 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení 100 %, 6.2 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení menší než 100 %, 6.3 Retenční prostor nádrže a 6.4 Komplexní řešení funkčních prostorů nádrže.

#### *ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY:*

Nejprve je nutné zmínit, že provedené výpočty a analýzy funkčních prostorů nádrží byly provedeny pouze na zásobním a retenčním prostoru. Jinými slovy nebyly aplikovány nejistoty na mrtvém prostoru a ani na prostoru stálého nadržení. Hodnoty těchto prostorů byly převzaty z manipulačních řádů nádrží.

V celé této práci jsou velikosti nejistot vstupujících do řešení zadávány jako standardní nejistoty typu B značeny jako  $u_B$  a dosažené výsledky jsou prezentovány jako rozšířená standardní nejistota  $U$  přenásobena koeficientem  $k = 2$ , tedy s pravděpodobností pokrytí 95 %.

První úloha zásobního prostoru nádrže pro zabezpečení 100 % má svým pojetím odhadnout potenciální nejistotu zásobního objemu nádrží. Zvoleným přístupem, kdy jsou výsledky vyhodnoceny pouze procentuálně, je možnost úlohu testovat na větším počtu vodních děl. Ovšem další úlohy z pohledu hlubší problematiky, složitosti řešení, a především z nárůstu rozsahu vyhodnocení a většímu obsahu výsledků je úloha zásobního prostoru nádrže pro zabezpečení menší než 100 % testována pouze na 2 nádržích, respektive na 1 nádrži pro řešení retenčního prostoru nádrže a komplexního řešení funkčních prostorů nádrže.

### 6.1 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení 100 %

V této kapitole jsou pomocí programu UNCE\_RESERVOIR provedeny analýzy k odhadnutí potenciální nejistoty zásobního objemu nádrží pro 100 % zabezpečení. Aplikace byla provedena na všech 6 zmíněných profilech vodních děl.

Požadované odtoky pro dané profily byly za účelem sjednocení a souhrnného vyhodnocení zadávány podle součinitele nalepšení  $\alpha$  [-]. Byly počítány varianty s požadovanými otoky od  $\alpha = 0,1$   $Q_a$  s krokem 0,1 až po možnou kapacitu profilu neboli kapacitu batygrafických křivek. Z tohoto důvodu není v této kapitole pracováno s konkrétními velikostmi zásobních objemů, ale pouze s procentuálními velikostmi koeficientu variace. Tyto procentuální velikosti jsou stanoveny podílem vypočtených rozšířených směrodatných odchylek zásobních objemů ku středním hodnotám zásobních objemů.

Velikosti výparů byly zjednodušeně zadávány ročním výparem podle manipulačních řádů nebo podle nadmořské výšky hladiny středního plnění nádrže. Obdobně byly zadávány velikosti průsaku tělesem hráze, ve většině případů podle manipulačního řádu u chybějících

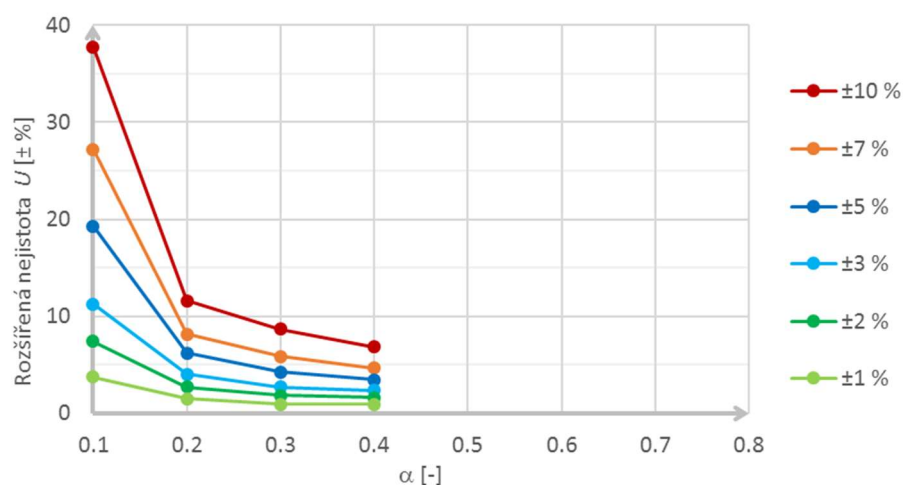
profilů byly průsaky odvozeny od podobných nádrží. Okrajová podmínka v podobě objemu stálého nadržení byla pro jednotlivé nádrže a velikosti  $\alpha$  měněna. Procentuální nastavení objemu stálého nadržení bylo v rozmezí cca 11 až 25 % (průměr všech výpočtů 17 %) z odpovídajícího řešení zásobního prostoru. Tato velikost byla přibližně nastavována podle stávajících nádrží v daných profilech.

Velikosti standardních vstupních nejistot na vstupních datech byly zadávány vždy konstantně o velikostech  $u_B = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 5, \pm 7$  a  $\pm 10$  %. Konkrétně na přítoku vody do nádrže, batygrafických křivkách, na výparu z vodní hladiny a průsaku tělesem hráze. Počet opakování byl vždy nastaven na 300. Výsledek je prezentovaný v podobě zásobního objemu deterministického řešení a střední hodnoty se směrodatnými odchylkami statistického řešení s variantou bez ztrát vody z nádrže a se ztrátami vody z nádrže.

#### POZNÁMKA:

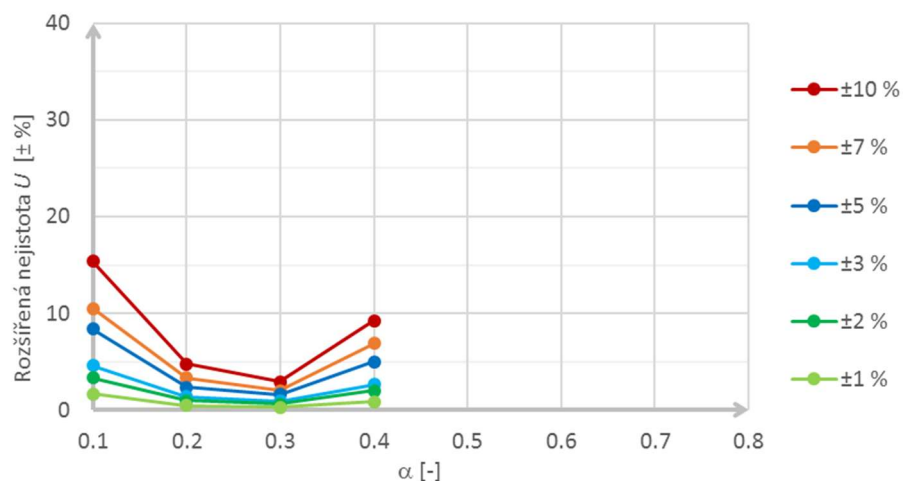
V přístupu přes procentuální vyjádření nevznikal téměř žádný rozdíl mezi výpočty bez ztrát a se ztrátami. Proto jsou v následujících výsledcích prezentovány pouze výsledky s uvažováním ztrát vody z nádrže.

Na Obr. 31 až 36 jsou znázorněny průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení  $\alpha$  a rozšířenými nejistotami zásobního objemu  $U$  v  $\pm$  % pro vstupní konstantní velikosti  $u_B = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 5, \pm 7$  a  $\pm 10$  %. Tento průběh je znázorněn pro všechny vybrané profily. Pro vyhodnocení výsledků byl použit základní koeficient rozšíření  $k=2$ , který jak bylo řečeno odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %.

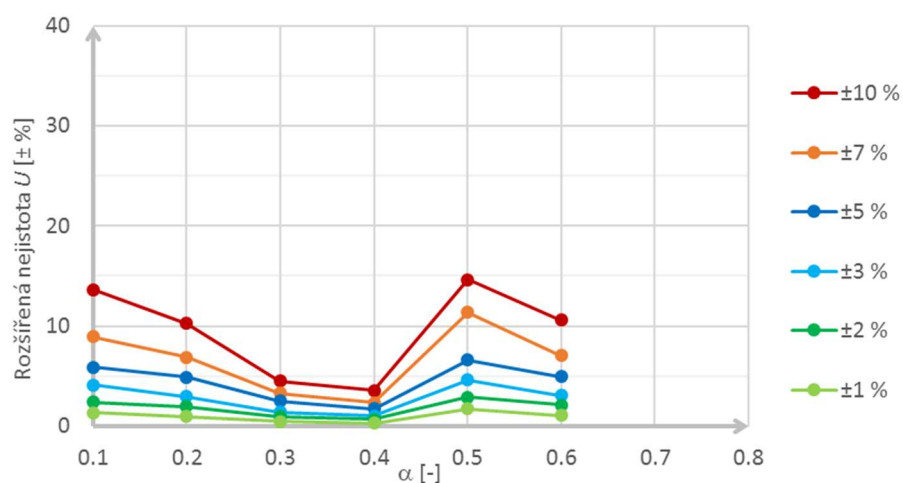


**Obr. 31** Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení  $\alpha$  [%] a rozšířenými nejistotami (pro  $k=2$ ) zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] v profilu VD Brno

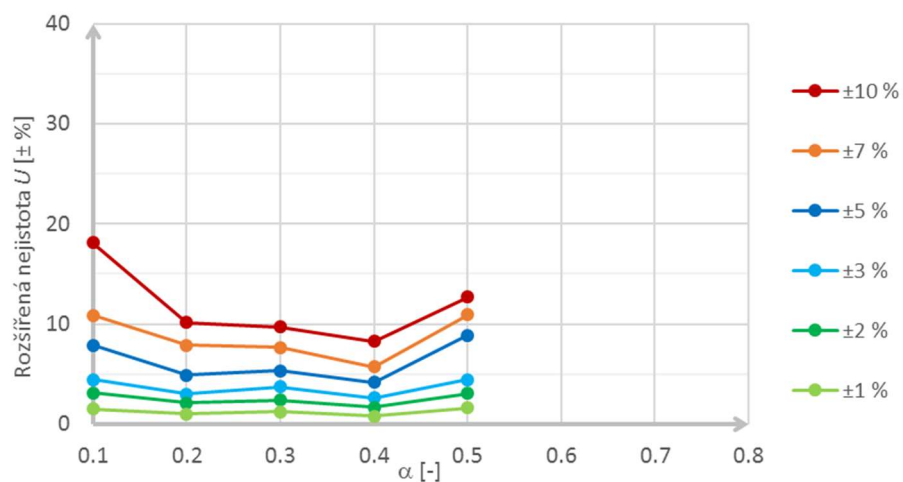




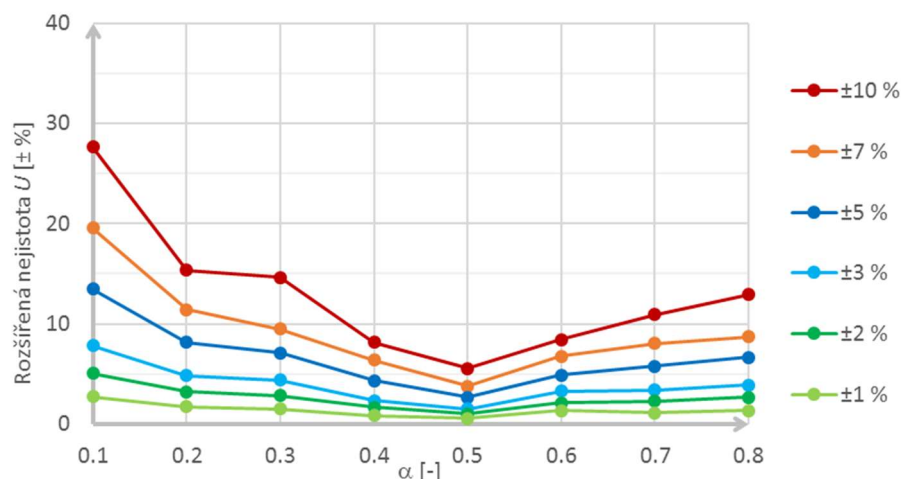
**Obr. 32** Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení  $\alpha$  [%] a rozšířenými nejistotami (pro  $k=2$ ) zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] v profilu VD Hubenov



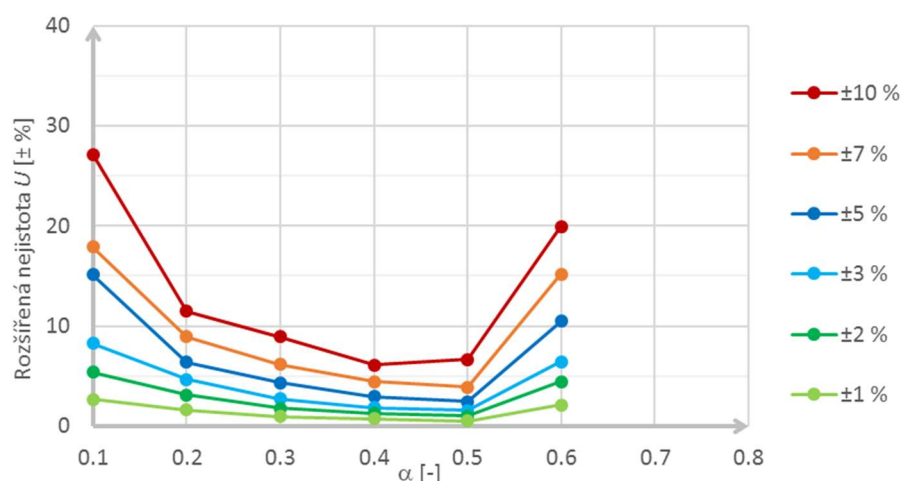
**Obr. 33** Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení  $\alpha$  [%] a rozšířenými nejistotami (pro  $k=2$ ) zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] v profilu VD Karolinka



**Obr. 34** Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení  $\alpha$  [%] a rozšířenými nejistotami (pro  $k=2$ ) zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] v profilu VD Mostiště



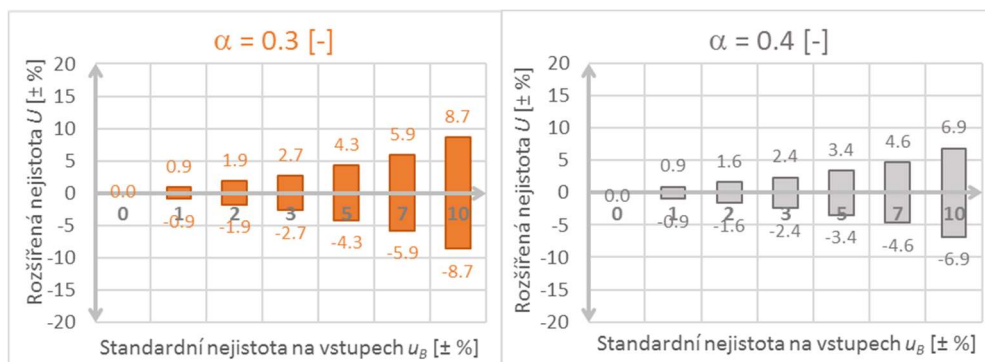
**Obr. 35** Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení  $\alpha$  [%] a rozšířenými nejistotami (pro  $k=2$ ) zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] v profilu VD Vír



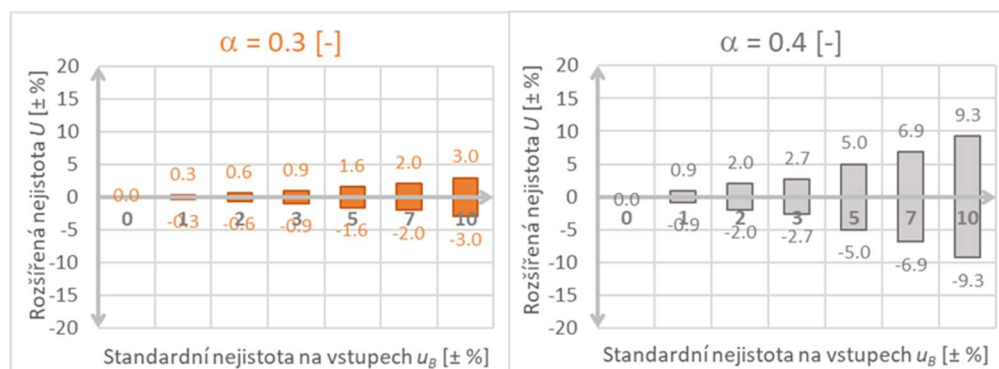
**Obr. 36** Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení  $\alpha$  [%] a rozšířenými nejistotami (pro  $k=2$ ) zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] v profilu VD Vranov

Z Obr. 31 až 36 pro jednotlivé vstupní nejistoty  $u_B$  můžeme pozorovat vyšší rozšířené nejistoty u krajních součinitelů nalepšení. Tento nárůst byl zaznamenán ve všech profilech. Obecně nízké  $\alpha$  pro samotný návrh nádrže odpadají a jsou pro samotnou nádrž téměř bezvýznamné. Pro další obecné porovnání a vyhodnocení ještě u profilu VD Vír I odpadají i  $\alpha=0,7$  a  $0,8$ , protože v jiných profilech nebylo tak velkých  $\alpha$  dosaženo z důvodu nedostatečné kapacity batygrafické křivky k velikostem  $Q_a$ .

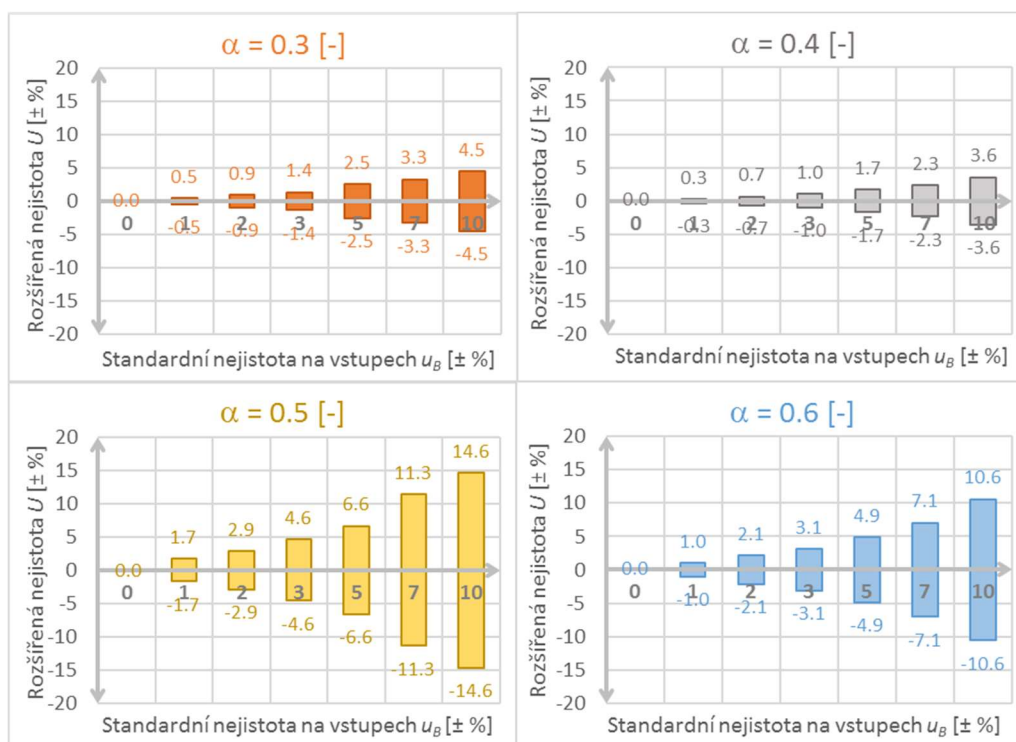
Dle očekávání a dosažených výsledků platí, že při vyšších uplatněných nejistotách  $u_B$  na vstupech rostou i výsledné rozšířené nejistoty zásobního objemu  $U$ . Tyto pozorované výsledky se vyskytovaly ve všech vyhodnocovaných profilech a jsou k vidění i u následujících Obr. 37 až 42, kde jsou výsledky detailněji interpretovány opět na všech profilech pro vybrané  $\alpha$  [-] v rozmezí od 0,3 do 0,6.



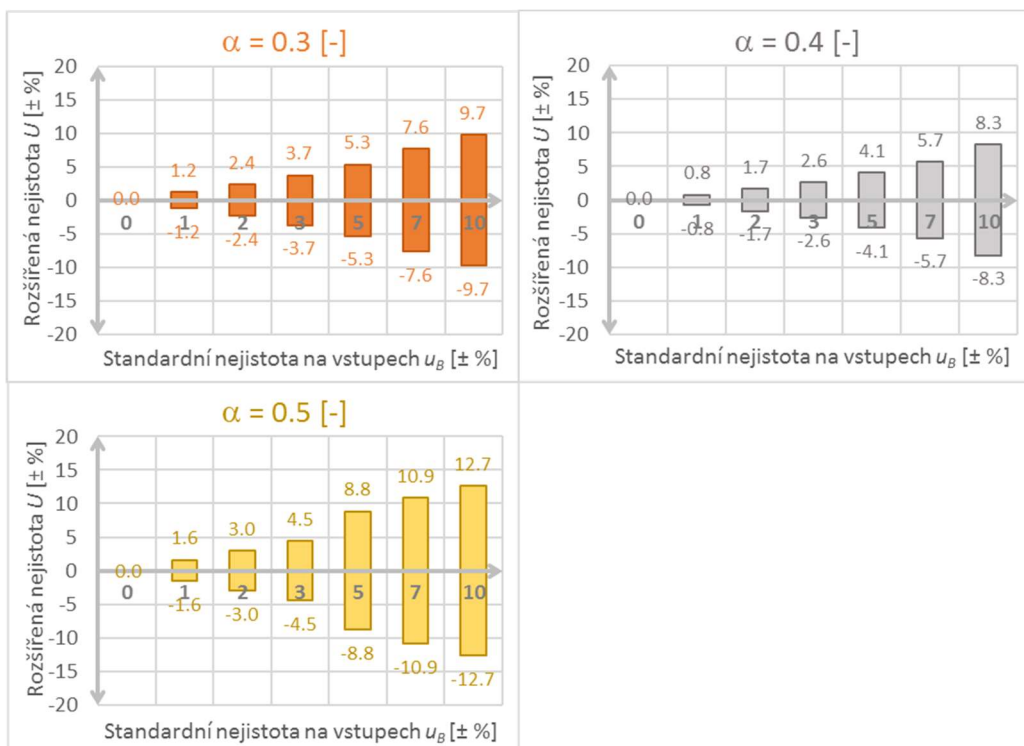
**Obr. 37** Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] a různé součinitele nalepšení  $\alpha$  [%] v profilu VD Brno



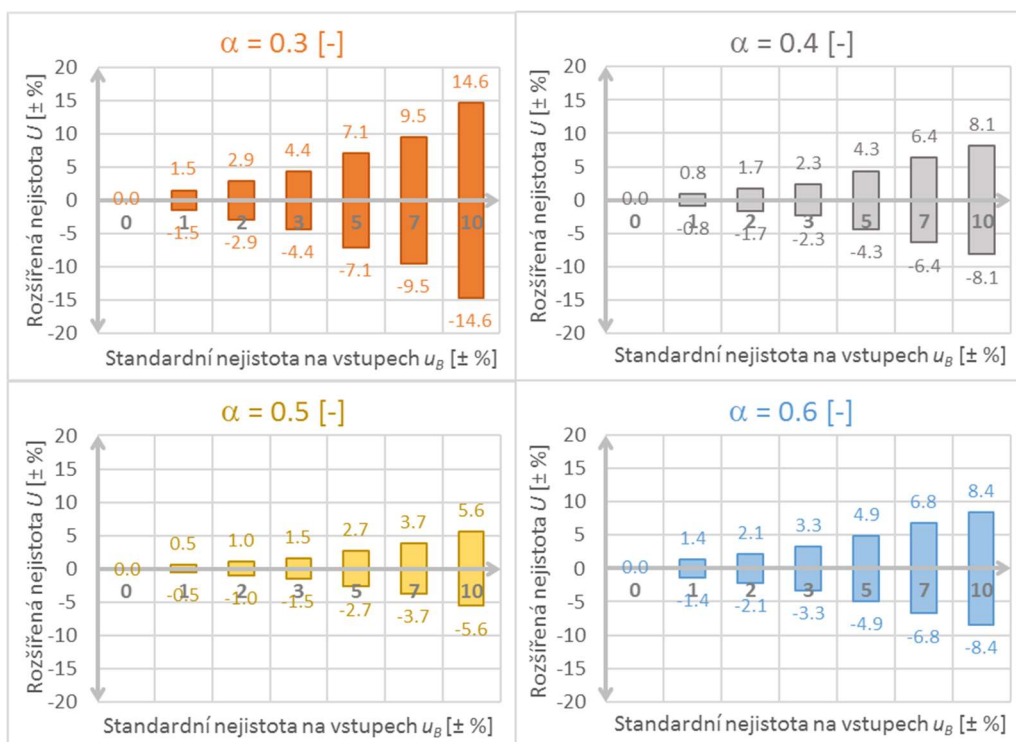
**Obr. 38** Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] a různé součinitele nalepšení  $\alpha$  [%] v profilu VD Hubenov



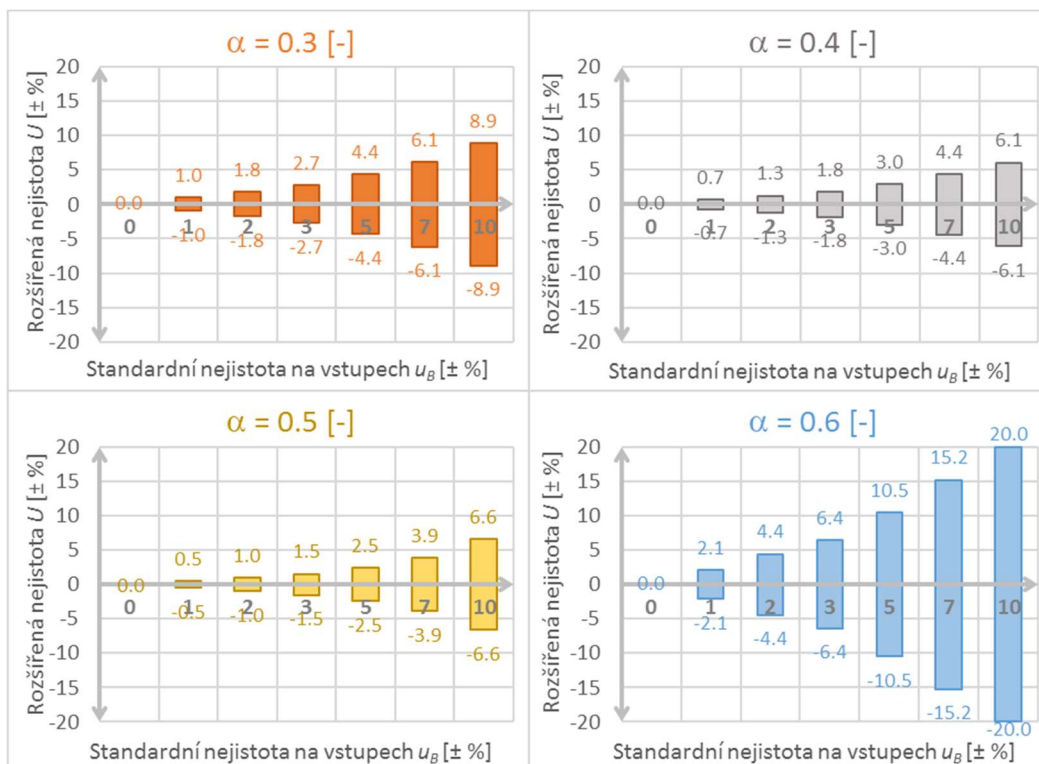
**Obr. 39** Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] a různé součinitele nalepšení  $\alpha$  [%] v profilu VD Karolinka



**Obr. 40** Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] a různé součinitele nalepšení  $\alpha$  [%] v profilu VD Mostiště



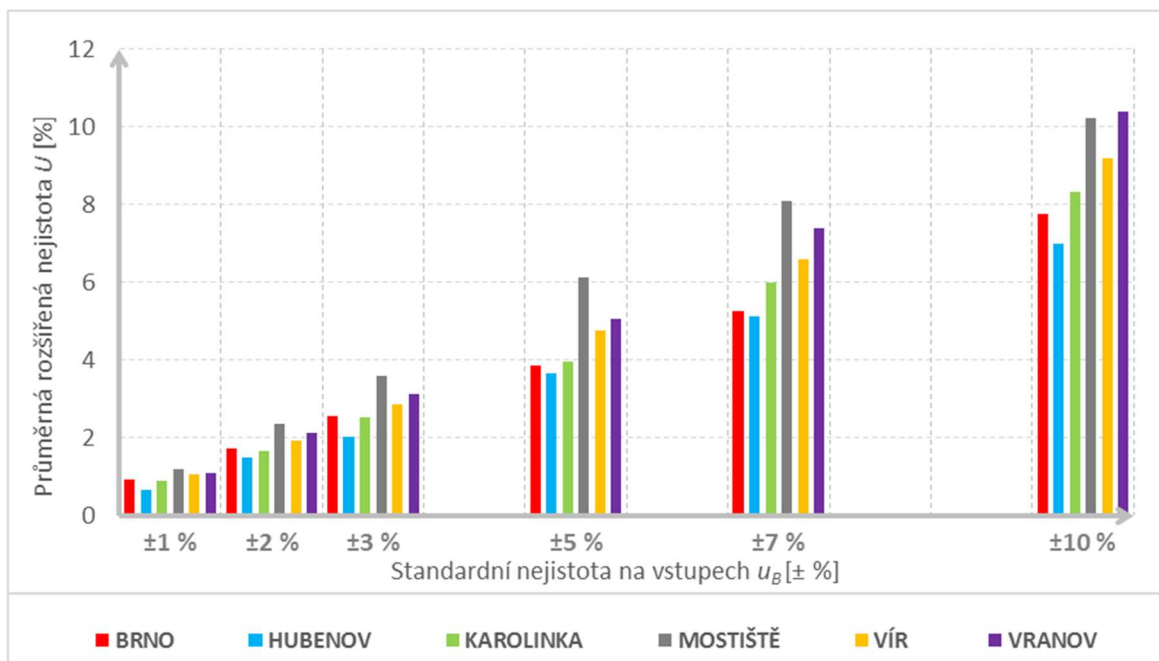
**Obr. 41** Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] a různé součinitele nalepšení  $\alpha$  [%] v profilu VD Vír I



**Obr. 42** Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu  $U$  [± %] pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] a různé součinitele nalepšení  $\alpha$  [%] v profilu VD Vranov

Z Obr. 37 až 42 je vidět, že se velikosti rozšířených nejistot zásobních objemů napříč měnily a nebyla pozorována žádná závislost mezi jednotlivými profily jako např. pro profily s menší/větší kapacitou zásobního objemu nebo méně/více vodné profily. Konkrétně nejméně vodným profilem je profil VD Karolinka, ten pro  $\alpha = 0,4$  dosahuje v porovnání s ostatními profily nejmenší rozšířené nejistoty  $U$ , ale naopak pro  $\alpha = 0,5$  dosahuje nejvyšší nejistoty  $U$ . Nejvíce vodným profilem je profil VD Vranov, ten pro  $\alpha = 0,6$  dosahuje největších nejistot  $U$ , ale pro  $\alpha = 0,4$  a  $\alpha = 0,5$  dosahuje v porovnání s ostatními profily výrazně podprůměrných hodnot rozšířených nejistot  $U$ .

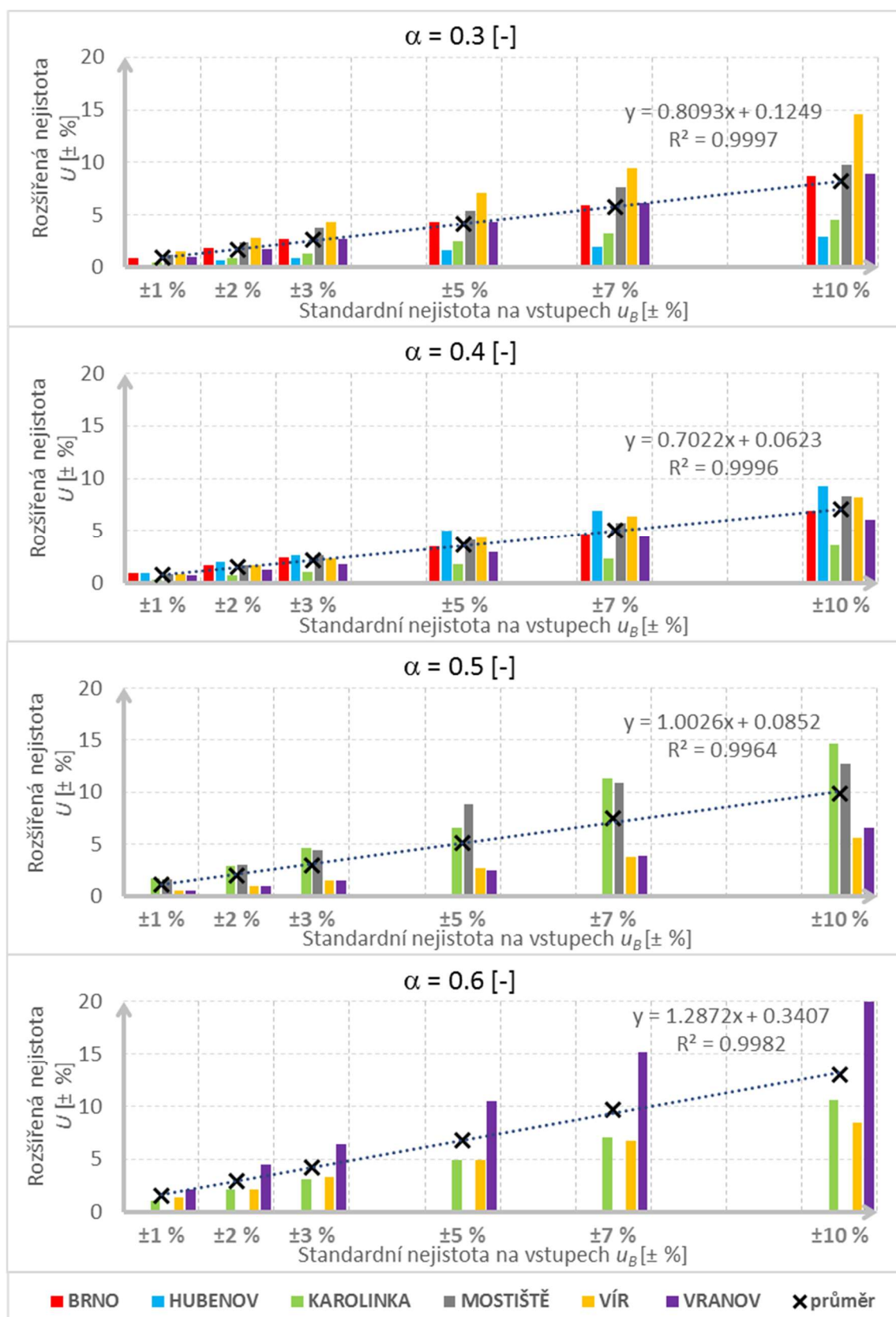
Dále je vykreslen Obr. 43, kde jsou pro všechny vyhodnocované  $\alpha$  jednotlivých profilů VD zprůměrované výsledné rozšířené nejistoty  $U$ .



**Obr. 43** Výsledky průměrných rozšířených nejistot zásobního objemu  $U [\pm \%]$  jednotlivých profilů pro součinitele nalepšení  $\alpha = 0,3$  až  $0,6 [\%]$  a uvažované vstupní nejistoty  $u_B [\pm \%]$

Vzhledem k nevyskytující se žádné závislosti napříč profily byly výsledky všech profilů zprůměrovány, což je pro paušální odhad velikosti potenciální nejistoty zásobního objemu vhodná volba. Pro zprůměrovaný průběh rozšířených nejistot  $U$  ze všech profilů pozorujeme téměř lineární závislosti mezi nárůstem rozšířených nejistot  $U$  a standardních vstupních nejistot  $u_B$  pro všechny vyhodnocené  $\alpha$ , jak je znázorněno na Obr. 44 hodnotou spolehlivosti  $R^2$ , která se blíží k hodnotě 1.





**Obr. 44** Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu  $U [\pm \%]$  pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B [\pm \%]$  a vybrané součinitele nalepšení  $\alpha [\%]$  všech vyhodnocovaných profilů včetně průměrné hodnoty

Odchyłka mezi zásobním objemem řešeným deterministicky a průměrem středních hodnot zásobních objemů řešených stochasticky dosahovala hodnot pro všechny profily testovaných VD od - 0,40 % do + 1,90 %. Konkrétně průměrná odchyłka pro Brno + 0,38 %, Hubenov + 0,07 %, Karolinka + 0,27 %, Mostiště + 0,32 %, Vír I + 0,12 % a Vranov + 0,51 %. Celkový průměr těchto odchylek pro všechny profily byl cca + 0,24 %. Získané výsledky stochastických zásobních objemů tedy dosahují o něco vyšších čísel než při deterministickém řešení. Takto malý rozdíl je ovšem téměř zanedbatelný, což potvrzuje správnost generátoru náhodných čísel a použité metody Monte Carlo. Naopak byl výrazný rozdíl ve výsledcích zásobních objemů mezi řešením bez ztrát a se ztrátami. Při uvažování ztrát vody z nádrže byl nárůst zásobního objemu v rozmezí od 2 do 15 %.

## 6.2 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení menší než 100 %

V této kapitole jsou pomocí programu UNCE\_RESERVOIR provedeny analýzy ke stanovení zásobního objemu nádrže pro zabezpečení menší než 100 % v podmínkách nejistot na 2 vybraných profilech, a to na VD Vír 1 a VD Vranov.

Velikosti výparů byly zadávány ročním výparem podle manipulačních řádů, konkrétně pro VD Vír 613 mm a VD Vranov 650 mm. Velikosti průsaku tělesem hráze byly odvozeny od podobných nádrží, konkrétně  $0,15 \text{ l s}^{-1}$  na  $1\,000 \text{ m}^2$ .

Velikosti standardních vstupních nejistot na přítoku vody do nádrže, batygrafických křivkách, výparu z vodní hladiny a průsaku tělesem hráze byly zadávány vždy konstantně o velikostech  $u_B = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 5$  a  $\pm 7$  % a rozdílně, označeno jako dle očekávání. Velikosti jednotlivých nejistot na vstupech dle očekávání jsou na základě popisu v kapitole 4.1.1. Možné nejistoty vstupující do vodohospodářského řešení nádrže a jejich vyčíslení. Konkrétně jsou v tomto případě voleny vstupní nejistoty  $u_B$  na přítoku  $\pm 3$  %, batygrafických křivkách  $\pm 5$  %, na výparu z vodní hladiny  $\pm 4$  % a průsaku tělesem hráze  $\pm 3$  % pro oba zvolené profily. Počet opakování byl vždy nastaven na 300 opakování. Výsledkem, který nás v této analýze zajímá, je výsledný zásobní objem deterministického řešení a optimalizované střední hodnoty se směrodatnými odchylkami pro statistické řešení včetně výsledné zabezpečení podle trvání  $P_T$ . Byla počítána varianta bez ztrát vody z nádrže a se ztrátami vody z nádrže. V následujících výsledcích jsou prezentovány pouze výsledky s uvažováním ztrát vody z nádrže.

Nejprve bylo nutné pro danou zabezpečení najít vyhovující odběry (požadované odtoky) pro aktualizované řady přítoků vody do nádrže. Zabezpečení je zvolena podle trvání  $P_T$ , která je pro oba profily 99,5 %, protože dle významnosti nádrže klasifikovaných v ČSN 75 2405 (ČSN 75 2405, 2017) spadají do kategorie A. Dle manipulačního řádu



nádrže Víř I je pro tuto zabezpečení požadovaný odtok  $O_P = 2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a pro nádrž Vranov je situace obtížnější, protože je nádrž řízena podle regulačních stupňů, a navíc je požadovaný odtok  $O_P$  odlišný pro jednotlivé měsíce.

**POZNÁMKA:**

Úloha je zjednodušena na řízení bez regulačních stupňů, tedy s konstantní řadou odlišných měsíčních požadovaných odtoků  $O_P$  pro každý rok.

V Tab. 3 jsou nejprve deterministicky a bez vstupních nejistot spočítány zabezpečení podle trvání  $P_T$  včetně uvažování ztrát vody z nádrže pro uvedený požadovaný odtok  $O_P$  a stávající zásobní objem nádrže  $V_Z$ , tedy úloha typu  $P_T = f(O_P, V_Z)$ . Můžeme vidět, že díky aktuální řadě přítoků vody do nádrže je zabezpečení nádrže  $P_T$  výrazně pod hranicí 99,5 %. Z tohoto důvodu byl  $O_P$  postupně snižován, abychom zabezpečili požadovanou zabezpečení  $P_T$  na zmiňovaných 99,5 %.

**Tab. 3** Výsledky zabezpečení  $P_T$  pro měnící se vstupní  $O_P$  na aktualizovaných datech VD Víř I

$P_T = f(O_P, V_Z)$		
$O_P$	>>>	$P_T$ se ztrátami
2.5		98.7759
2.4		99.0283
<b>2.3</b>		<b>99.5331</b>
2.31		99.4036

V Tab. 4 je deterministicky a bez vstupních nejistot spočítán zásobní objem nádrže  $V_Z$  včetně uvažování ztrát vody z nádrže pro vypočtený požadovaný odtok  $O_P$  na základě aktuálních dat a pro zabezpečení podle trvání  $P_T \geq 99,5 \%$ , tedy úloha typu  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T = 99,5 \%$ . Výsledný optimalizovaný zásobní objem nádrže  $V_Z$  by se měl blížit skutečnému objemu nádrže Víř I, který je 44,056 mil  $\text{m}^3$ . Na základě optimalizovaného  $V_Z$  se skutečným  $V_Z$  byl ještě měněn  $O_P$ . Z Tab.4 poté plyne hodnota  $O_P$  pro další výpočty.

**Tab. 4** Výsledky  $O_P$  pro měnící se vstupní  $O_P$  a  $P_T \geq 99,5 \%$  na aktualizovaných datech VD Víř I

$V_Z = f(O_P, P_T)$ pro $P_T \geq 99,5\%$		
$O_P$	>>>	$V_Z$ se ztrátami
2.3		43 657 000
2.31		44 371 700
<b>2.305</b>		<b>44 069 000</b>

Obdobně jako pro nádrž Víř I byly výpočty provedeny i pro nádrž Vranov. Odvození a stanovení hodnot požadovaného odtoku  $O_P$  bylo provedeno deterministicky a bez vstupních nejistot včetně uvažování ztrát vody z nádrže. Výpočet byl nejprve zjednodušeně proveden pro uváděné hodnoty regulačních stupňů s konstantním řízením každého roku. Následně

byly hledány hodnoty  $O_P$  pro reálnou zabezpečení nádrže  $P_T = 99,5 \%$  pro aktuální řadu přítoků vody do nádrže. Výsledky úlohy typu  $P_T = f(O_P, V_Z)$  můžeme vidět v Tab. 5.

**Tab. 5** Výsledky zabezpečení  $P_T$  pro měnící se vstupní  $O_P$  na aktualizovaných datech VD Vranov

$P_T = f(O_P, V_Z)$												>>>	$P_T$ se ztrátami
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
5.50	5.50	5.50	5.50	5.70	5.90	5.90	5.70	5.60	5.50	5.50	5.50		99.4138
5.40	5.40	5.40	5.40	5.60	5.80	5.80	5.60	5.50	5.40	5.40	5.40		99.6195
<b>5.40</b>	<b>5.40</b>	<b>5.40</b>	<b>5.40</b>	<b>5.70</b>	<b>5.80</b>	<b>5.80</b>	<b>5.70</b>	<b>5.50</b>	<b>5.40</b>	<b>5.40</b>	<b>5.40</b>		<b>99.5167</b>

V Tab. 5 a Tab. 6 hodnoty  $O_P$  [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] v prvním řádku odpovídají regulačnímu stupni III. V Tab. 6 je deterministicky a bez vstupních nejistot včetně ztrát vody z nádrže pro vypočtený požadovaný odtok  $O_P$  na základě aktuálních dat a pro zabezpečení podle trvání  $P_T \geq 99,5 \%$  řešena úloha typu  $V_Z = f(O_P, P_T)$  pro  $P_T = 99,5 \%$ . Z Tab.6 poté plynou měsíční hodnoty  $O_P$  pro další výpočty.

**Tab. 6** Výsledky  $O_P$  pro měnící se vstupní  $O_P$  a  $P_T \geq 99,5 \%$  na aktualizovaných datech VD Vranov

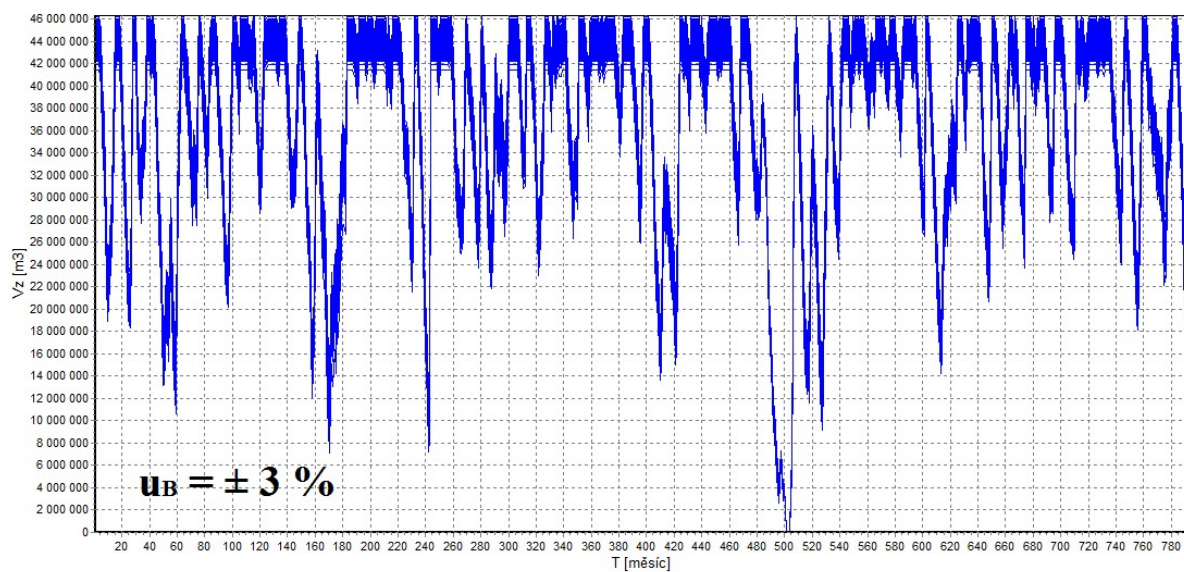
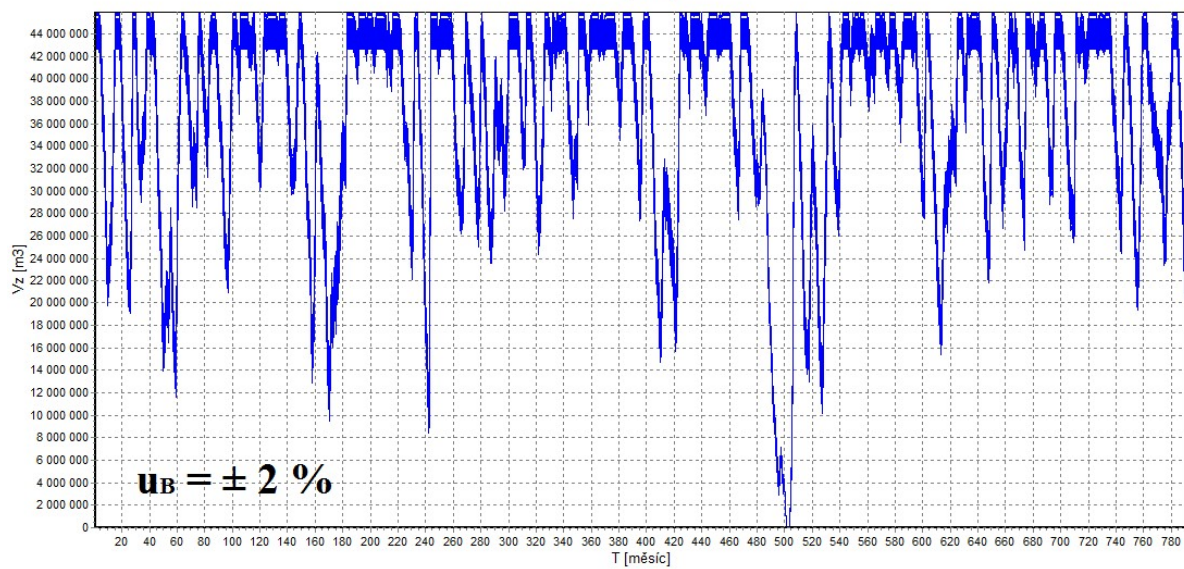
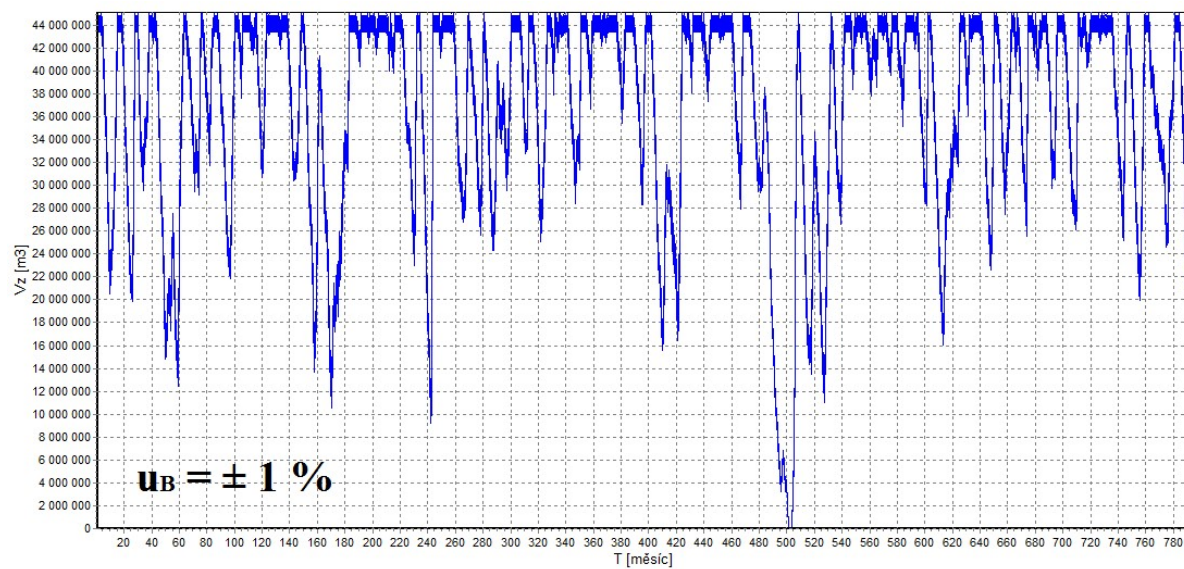
$V_Z = f(O_P, P_T)$ pro $P_T < 100 \%$ (99,5%)												>>>	$V_Z$ se ztrátami
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
5.50	5.50	5.50	5.50	5.70	5.90	5.90	5.70	5.60	5.50	5.50	5.50		83 884 128
5.40	5.40	5.40	5.40	5.70	5.90	5.90	5.70	5.50	5.40	5.40	5.40		80 812 784
<b>5.40</b>	<b>5.40</b>	<b>5.40</b>	<b>5.40</b>	<b>5.70</b>	<b>5.90</b>	<b>5.90</b>	<b>5.60</b>	<b>5.50</b>	<b>5.40</b>	<b>5.40</b>	<b>5.40</b>		<b>79 783 744</b>

Následně byly provedeny analýzy plnění a prázdnění nádrže Vír I pro celou řadu přítoku vody do nádrže a pro vstupní konstantní nejistoty  $\pm 1$  až  $\pm 7 \%$  a pro očekávané velikosti nejistot. V Tab. 7 jsou vypočtené střední hodnoty optimalizovaných zásobních objemů včetně směrodatných odchylek. Dále jsou tyto výsledky opět vyhodnoceny formou přičtení horní a dolní meze koeficientem rozšíření  $k = 2$ , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %. V posledním řádku je ještě uveden 95 % kvantil optimalizovaného zásobního objemu nádrže Vír I.

**Tab. 7** Výsledky analýzy optimálních zásobních objemů  $V_Z$  nádrže Vír I

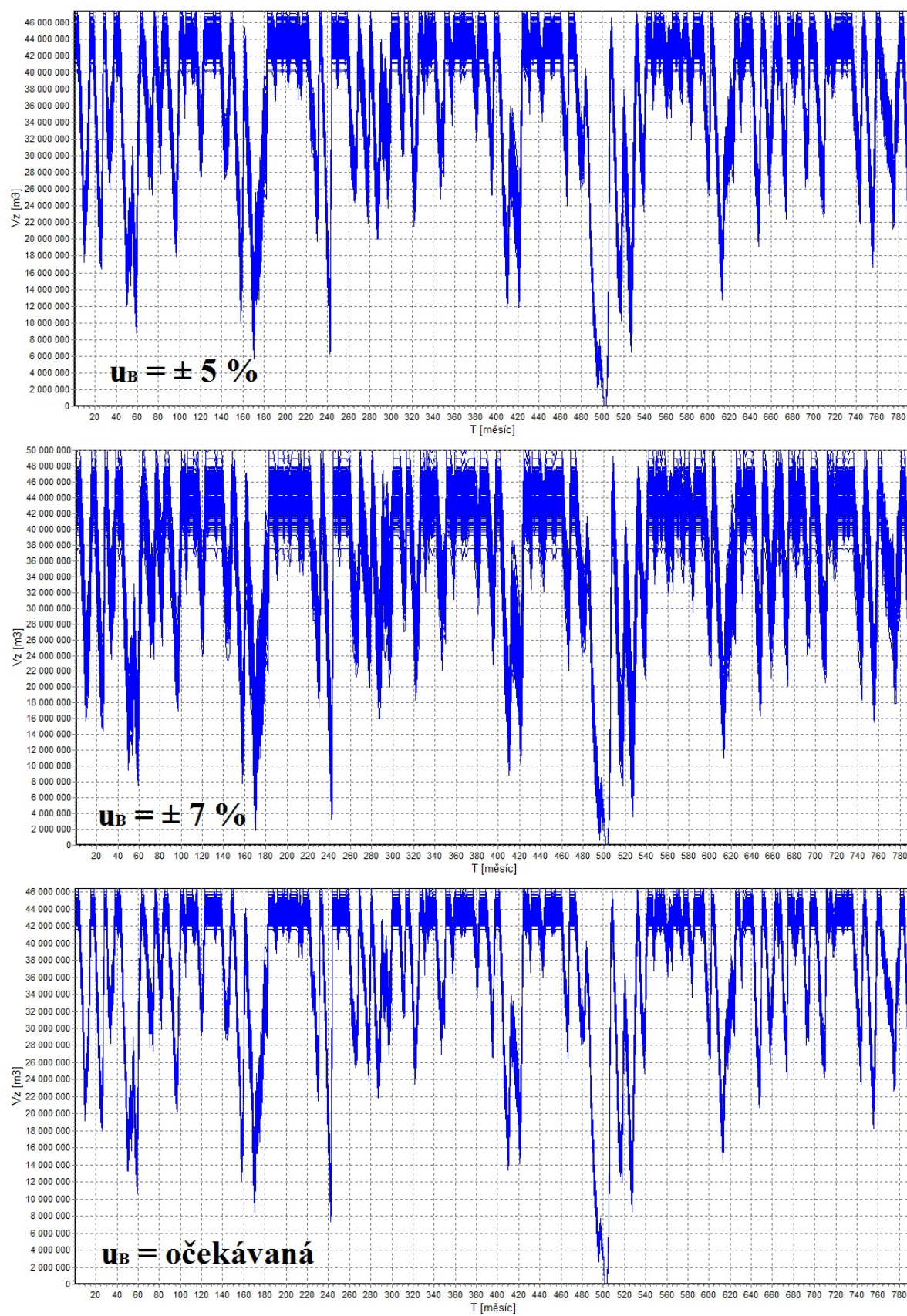
[ $\text{m}^3$ ]	$u_B = \pm 0 \%$	$u_B = \pm 1 \%$	$u_B = \pm 2 \%$	$u_B = \pm 3 \%$	$u_B = \pm 5 \%$	$u_B = \pm 7 \%$	$u_B$ očekávaná
$\mu (V_Z)$	44 069 000	44 098 652	44 121 960	44 154 544	44 010 168	44 078 572	44 148 504
$\pm 2\sigma (V_Z)$	0	545 346	1 137 567	1 627 581	2 574 596	3 958 923	1 621 724
$V_Z$ dolní $2\sigma (V_Z)$	44 069 000	43 553 306	42 984 393	42 526 963	41 435 572	40 119 649	42 526 780
$V_Z$ horní $2\sigma (V_Z)$	<b>44 069 000</b>	<b>44 643 998</b>	<b>45 259 527</b>	<b>45 782 125</b>	<b>46 584 764</b>	<b>48 037 495</b>	<b>45 770 228</b>
<b>95% kvantil <math>V_Z</math></b>	<b>44 069 000</b>	<b>44 673 900</b>	<b>45 114 800</b>	<b>45 496 700</b>	<b>46 569 400</b>	<b>47 560 700</b>	<b>45 628 200</b>

Na Obr. 45 a 46 jsou vypočtené průběhy plnění a prázdnění znázorněny. Tyto průběhy jsou znázorněny pro všechny uvažované vstupní nejistoty včetně varianty očekávaných velikostí vstupních nejistot.



**Obr. 45** Průběhy plnění a prázdnění optimalizovaného zásobního objemu  $V_Z$  nádrže Víř I  
pro  $u_B = \pm 1, \pm 2$  a  $\pm 3 \%$



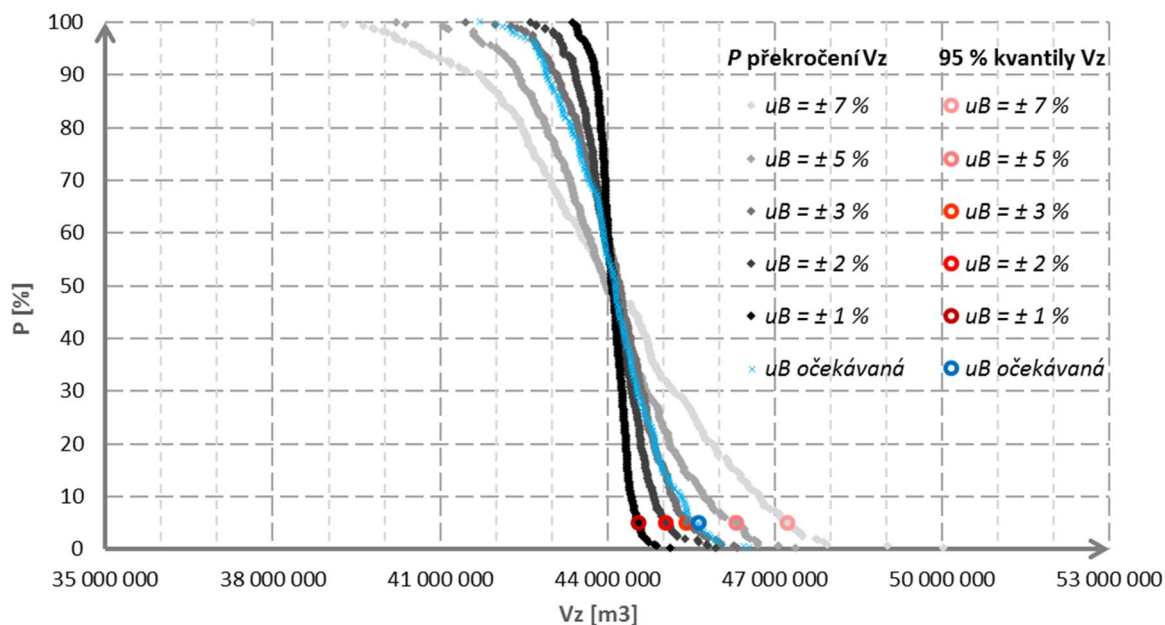


**Obr. 46** Průběhy plnění a prázdnění optimalizovaného zásobního objemu  $V_Z$  nádrže Víř I  
pro  $u_B = \pm 5, \pm 7 \%$  a očekávané

Na průbězích plnění a prázdnění nádrže Vír I vykreslených na Obr. 45 a 46 lze pěkně vidět nárůst rozptylu možných řešení s rostoucími vstupními nejistotami. Očekávané nastavení vstupních nejistot ovlivnilo průběhy plnění a prázdnění nádrže přibližně jako jednotné nastavení vstupních nejistot  $u_B = \pm 3 \%$ .

Pro očekávané nejistoty vstupních dat je výsledný optimalizovaný zásobní objem nádrže  $44,1485 \text{ mil. m}^3 \pm 1,6217 \text{ mil. m}^3$  pro 95 % pravděpodobnostní pokrytí neboli výsledek leží v intervalu  $\{42\,526\,780; 45\,770\,228\}$ . Na stranu bezpečnou je žádoucí při stochastickém řešení uvažovat s výsledným horním intervalem, tedy s vyšším zásobním objemem. Vyjádření 95 % kvantilem je výsledný optimalizovaný objem  $45,6282 \text{ mil. m}^3$ , v porovnání s horním kvantilem je tato hodnota  $V_Z$  o 0,31 % nižší. Relativně bezpečná, a tedy doporučená výsledná hodnota zásobního objemu Vír I z této analýzy je  $45,770 \text{ mil. m}^3$ . Na základě aktualizované vstupní řady přítoků vody do nádrže a zavedení vstupních nejistot včetně uvažování ztrát vody z nádrže je tedy doporučeno navýšení stávajícího zásobního objemu nádrže Vír I o téměř 3,9 %, přesně o  $1,714 \text{ mil. m}^3$ .

Výsledky souborů optimálních zásobních objemů nádrže, konkrétně získaná maxima z průběhu plnění a prázdnění nádrže Vír I z Obr. 45 a 46, jsou ukázány na Obr. 47 formou bodů pravděpodobnosti překročení. Každý bod z celkového počtu 300 bodů tvoří křivku pravděpodobnosti překročení daného nastavení. Každá křivka pravděpodobnosti překročení odpovídá jednomu typu nastavení vstupních nejistot. Dále je na každé křivce vyznačen 95 % kvantil, který byl použit pro vyhodnocení.



**Obr. 47** Pravděpodobnosti překročení výsledných optimalizovaných zásobních objemů nádrže Vír I pro různé velikosti vstupních nejistot

Na Obr. 47 můžeme vidět, že pro pravděpodobnost  $P = 50 \%$  dosahují optimalizované hodnoty  $V_Z$  všech průběhů těsně nad 44 mil. m<sup>3</sup>, což je obdobně jako u deterministického řešení. Průběhy jednotlivých křivek jsou relativně symetrické. Výsledné střední hodnoty optimalizovaných zásobních objemů  $\mu(V_Z)$  v Tab. 7 nabývají v porovnání od stávající hodnoty zásobního objemu nádrže Vír I procentuálních hodnot od 0,10 % (pro  $u_B = \pm 5 \%$ ) do +0,22 % (pro  $u_B = \pm 3 \%$ ). Průměr těchto odchylek pro všechny vstupní nejistoty byl cca +0,09 %. Získané výsledky stochastických optimalizovaných zásobních objemů dosahují pouze o trochu vyšších hodnot než při deterministickém řešení. Tyto faktory opět potvrzují správnost generátoru náhodných čísel a vhodné použití metody Monte Carlo.

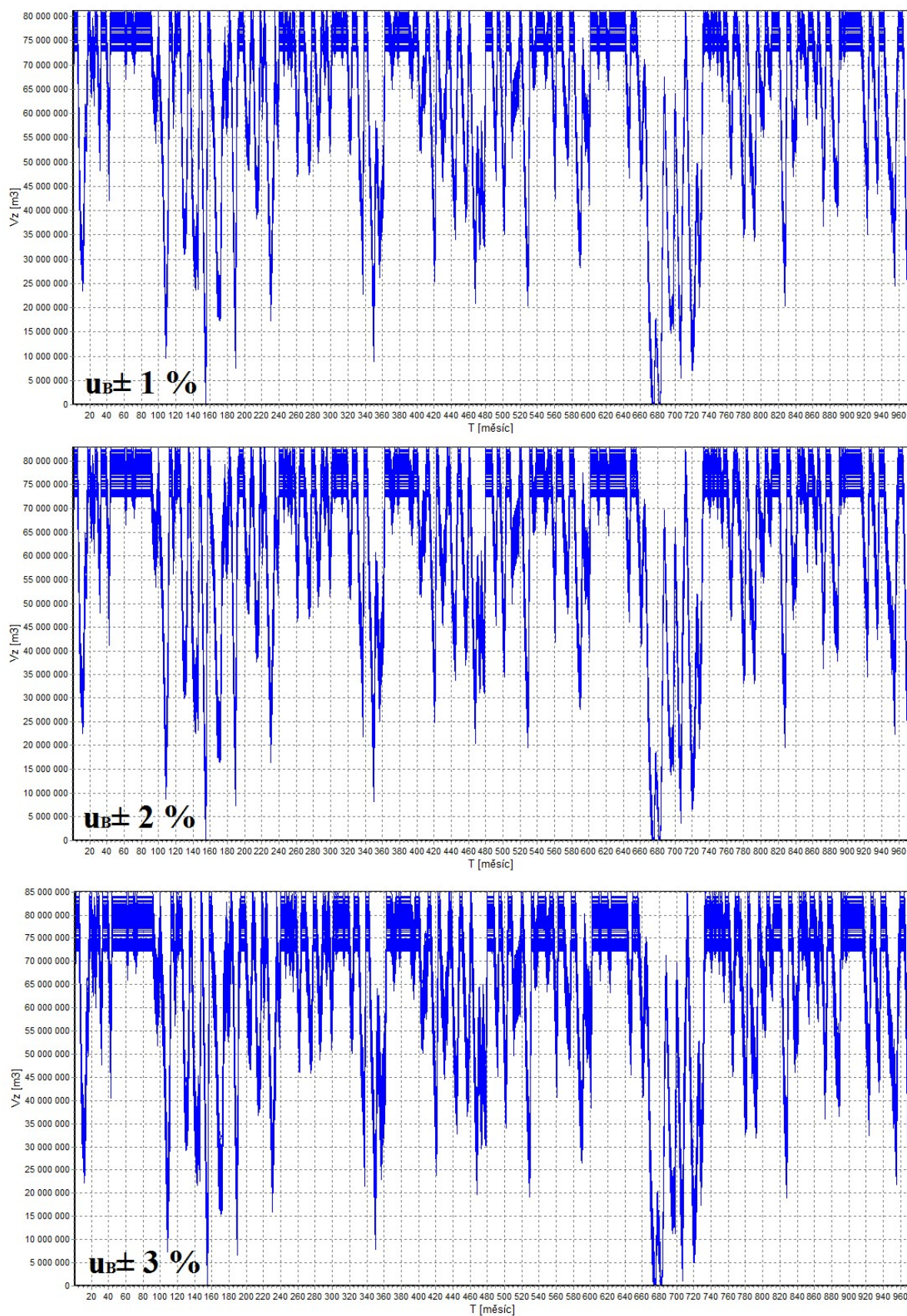
Obdobně jako pro nádrž Vír I byly provedeny analýzy plnění a prázdnění nádrže Vranov. Opět byla použita aktualizovaná celá řada přítoku vody do nádrže a uvažovány vstupní konstantní nejistoty  $\pm 1$  až  $\pm 7 \%$  včetně očekávaných velikostí nejistot, které byly uvažovány stejně jako u profilu Vír I. V Tab. 8 jsou vypočtené střední hodnoty optimalizovaných zásobních objemů včetně směrodatných odchylek. Tyto výsledky jsou opět vyhodnoceny formou přičtení horní a dolní meze koeficientem rozšíření  $k = 2$ , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 % a v posledním řádku je uveden 95 % kvantil optimalizovaného zásobního objemu nádrže Vranov.

**Tab. 8** Výsledky analýzy optimálních zásobních objemů  $V_Z$  nádrže Vranov

[m <sup>3</sup> ]	$u_B = \pm 0 \%$	$u_B = \pm 1 \%$	$u_B = \pm 2 \%$	$u_B = \pm 3 \%$	$u_B = \pm 5 \%$	$u_B = \pm 7 \%$	$u_B$ očekávaná
$\mu(V_Z)$	79 783 744	76 935 488	77 206 264	76 725 512	77 816 296	78 125 344	76 839 928
$\pm 2\sigma(V_Z)$	0	6 188 641	6 443 697	7 012 693	8 474 134	10 482 423	7 069 587
$V_Z$ dolní $2\sigma(V_Z)$	79 783 744	70 746 847	70 762 567	69 712 819	69 342 162	67 642 921	69 770 341
$V_Z$ horní $2\sigma(V_Z)$	<b>79 783 744</b>	<b>83 124 129</b>	<b>83 649 961</b>	<b>83 738 205</b>	<b>86 290 430</b>	<b>88 607 767</b>	<b>83 909 515</b>
<b>95% kvantil <math>V_Z</math></b>	<b>79 783 744</b>	<b>80 546 688</b>	<b>81 381 168</b>	<b>81 989 744</b>	<b>85 219 168</b>	<b>87 685 168</b>	<b>82 411 744</b>

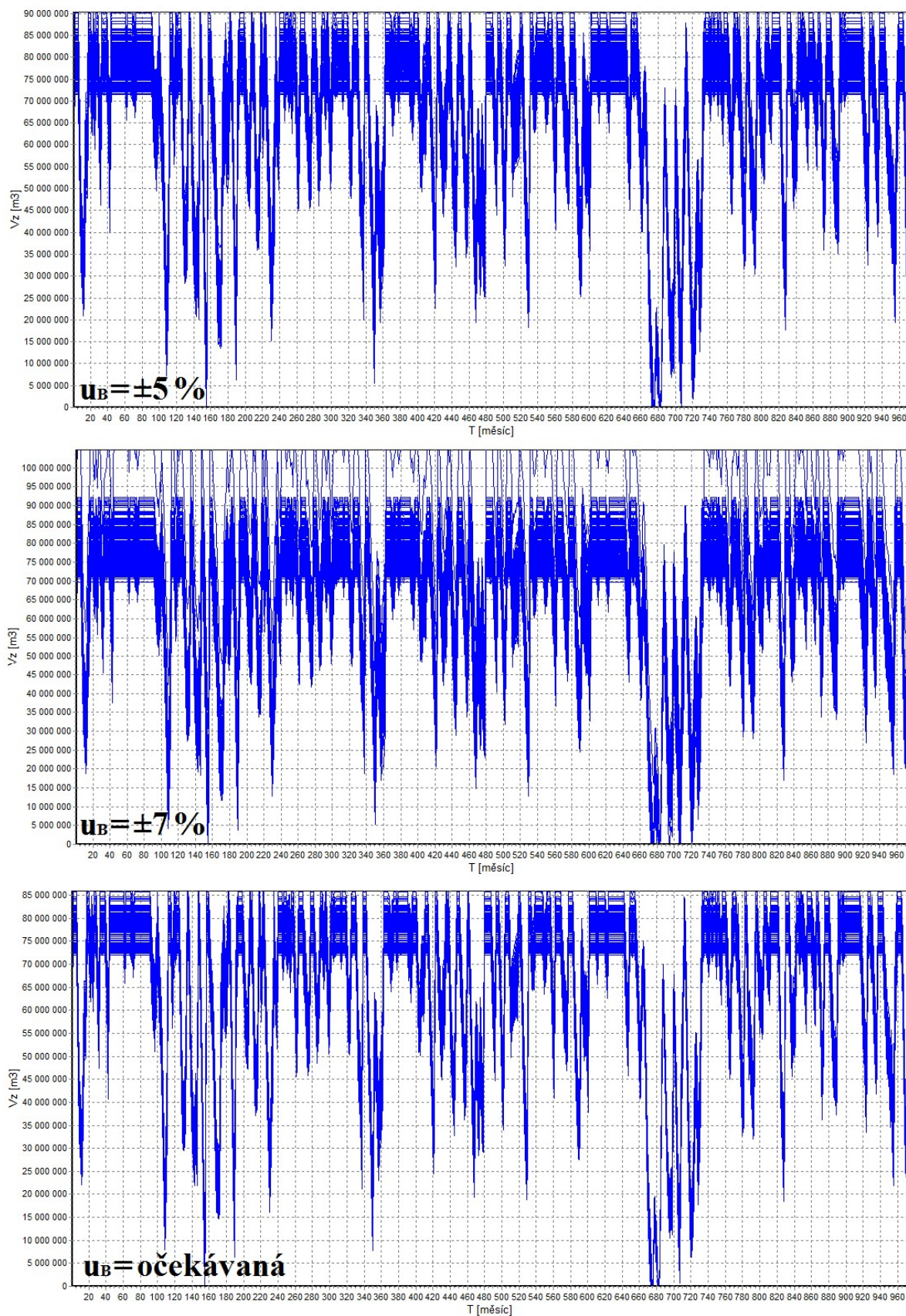
Na Obr. 48 a 49 jsou vypočtené průběhy plnění a prázdnění znázorněny. Tyto průběhy jsou znázorněny pro všechny uvažované vstupní nejistoty včetně varianty očekávaných velikostí vstupních nejistot.





**Obr. 48** Průběhy plnění a prázdnění optimalizovaného zásobního objemu  $V_Z$  nádrže Vranov  
pro  $u_B = \pm 1, \pm 2$  a  $\pm 3 \%$





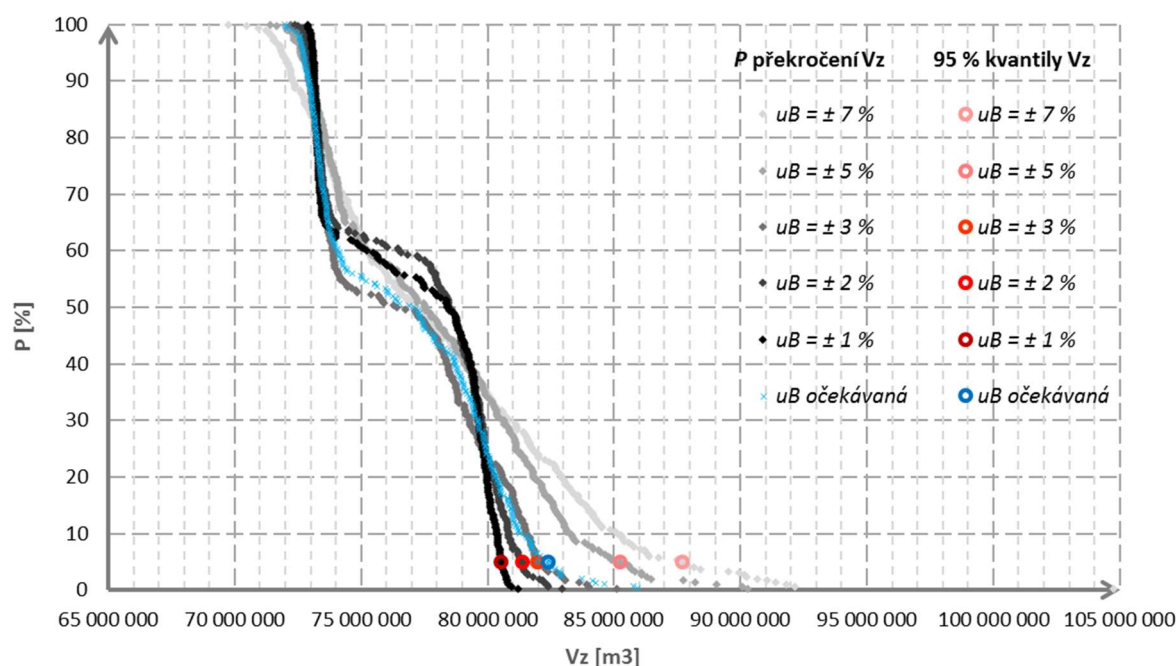
**Obr. 49** Průběhy plnění a prázdnění optimalizovaného zásobního objemu  $V_Z$  nádrže Vranov  
pro  $u_B = \pm 5, \pm 7 \%$  a očekávané



Na průbězích plnění a prázdnění nádrže Vranov vykreslených na Obr. 48 a 49 lze pěkně vidět nárůst rozptylu možných řešení s rostoucími vstupními nejistotami. Očekávané nastavení vstupních nejistot ovlivnilo průběhy plnění a prázdnění nádrže přibližně jako jednotné nastavení vstupních nejistot  $u_B = \pm 3 \%$ , stejně jako tomu bylo u nádrže Vír I.

Pro očekávané nejistoty vstupních dat je výsledný optimalizovaný zásobní objem nádrže  $76,8399 \text{ mil. m}^3 \pm 7,0696 \text{ mil. m}^3$  pro 95 % pravděpodobnostní pokrytí neboli výsledek leží v intervalu  $\{69\,770\,341; 83\,909\,515\}$ . Na stranu bezpečnou je žádoucí při stochastickém řešení uvažovat s výsledným horním intervalem, tedy s vyšším zásobním objemem. Vyjádření 95 % kvantilem je výsledný optimalizovaný objem  $82,4117 \text{ mil. m}^3$ , v porovnání s horním kvantilem je tato hodnota  $V_Z$  o 1,78 % nižší. Relativně bezpečná, a tedy doporučená výsledná hodnota zásobního objemu Vranov z této analýzy je  $83,910 \text{ mil. m}^3$ . Na základě aktualizované vstupní řady přítoků vody do nádrže a zavedení vstupních nejistot včetně uvažování ztrát vody z nádrže je doporučeno navýšení stávajícího zásobního objemu nádrže Vranov o více jak 5,3 %, konkrétně o  $4,239 \text{ mil. m}^3$ .

Stejně jako u nádrže Vír I jsou výsledky souborů optimálních zásobních objemů nádrže, konkrétně získaná maxima z průběhu plnění a prázdnění nádrže Vranov z Obr. 48 a 49, ukázány na Obr. 50 jako body pravděpodobnosti překročení. Každý bod z celkového počtu 300 bodů tvoří křivku pravděpodobnosti překročení daného nastavení. Každá křivka pravděpodobnosti překročení odpovídá jednomu typu nastavení vstupních nejistot. Dále je na každé křivce vyznačen 95 % kvantil, který byl použit pro vyhodnocení.



**Obr. 50** Pravděpodobnosti překročení výsledných optimalizovaných zásobních objemů nádrže Vranov pro různé velikosti vstupních nejistot

Na Obr. 50 můžeme vidět, že 50 % pravděpodobnost pro všechny průběhy je tentokrát v rozmezí od 76,5 do 78,5 mil. m<sup>3</sup>, což jsou hodnoty nižší než u deterministického řešení. Průběhy jednotlivých křivek zůstávají relativně symetrické. Výsledné střední hodnoty optimalizovaných zásobních objemů v Tab. 8 jsou v porovnání od stávající hodnoty zásobního objemu nádrže Vranov od -3,69 % (pro  $u_B = \pm 3$  %) do -1,93 % (pro  $u_B = \pm 7$  %). Průměr těchto odchylek pro všechny vstupní nejistoty byl cca -3,00 %. Získané výsledky stochastických optimalizovaných zásobních objemů dosahují tedy nižších hodnot než při deterministickém řešení. Tento pokles zásobních objemů nebyl u nádrže Vír I pozorován. Při jiném výpočtu na nádrži Vranov s odlišným vstupním  $O_P$  než který vzešel z Tab. 6, nebyl pokles také zaznamenán, viz (Paseka a Marton, 2019). I přes relativně výrazný pokles středních hodnot byl celkový návrh zásobního objemu, který uvažuje vstupní nejistoty a ztráty vody z nádrže, vyšší než stávající zásobní objem.

### 6.3 Retenční prostor nádrže

V této kapitole je pomocí programu TRANSFOM\_WAVE provedena analýza ke stanovení retenčního objemu nádrže pomocí transformace povodňových vln. Praktická aplikace je prezentována pouze na profilu VD Vír I.

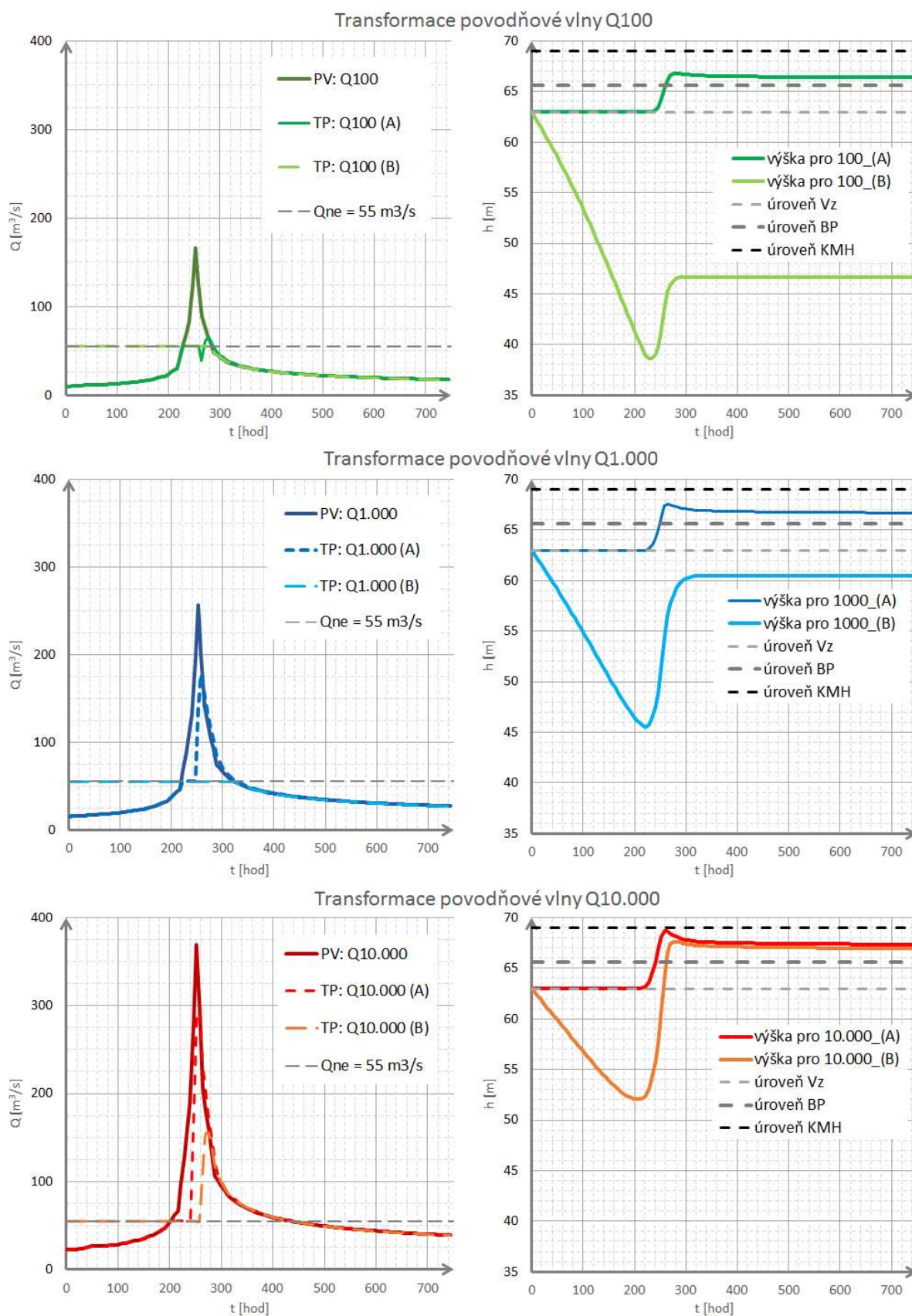
V této úloze byly aplikovány standardní vstupní nejistoty pouze na přítoku vody do nádrže neboli na povodňových vlnách o velikostech  $u_B = \pm 5, \pm 10, \pm 15$  %. Počet opakování byl stejně jako u zásobního objemu nádrže vždy nastaven na 300 opakování. Výsledky, které jsou u této aplikace zajímavé, jsou střední hodnoty a směrodatné odchylky kulminací transformovaných povodní a dosažených kulminačních výšek vody v nádrži. Pro vhodnou prezentaci výsledků byly vypočtené hodnoty transformací a dosažených výšek vody statisticky vyhodnoceny pomocí středních hodnot a směrodatných odchylek jako u zásobního prostoru.

Pro výpočet byly použity aktualizované povodňové vlny poskytnuté ČHMÚ z roku 2008. Pro testování byly použity konkrétně povodňové vlny  $Q_{100}$ ,  $Q_{1.000}$  a  $Q_{10.000}$  dle klasické regrese bez rozlišení sezonality s časovým krokem 360 min. Další doplňující informace pro samotný výpočet jsou následující: i) určení tzv. kontrolní maximální hladiny KMH v nádrži dle (ČSN 75 2935, 2014) a (Manipulační řád VD Vír I, 2011). Tato KMH je na úrovni koruny hráze, tedy 470,45 m n. m. ii) Startovací hladina byla na úrovni maximálního zásobního objemu, tedy 464,45 m n. m. iii) Při maximální hladině je průtok spodními výpustěmi maximálně  $2 \times 40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . iiiii) Bezpečnostní přeliv na kótě 467,05 m n. m. je konstrukce korunové nehrazené o celkové délce 60,5 m ( $5 \times 12,1 \text{ m}$ ) s kapacitou  $180,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  na úrovni retenčního prostoru neovladatelného. Na základě uvedených informací o spodních výpustích, bezpečnostním přelivu a rovnic (12) a (13) byl

stanoven výtokový součinitel spodních výpustí neboli součinitel odtoku  $\mu$  a součinitel přepadu  $m$ . Konkrétně pro nádrž Vír I vyšel součinitel odtoku  $\mu = 0,435 [-]$  a součinitel přepadu  $m = 0,407 [-]$ .

Pro testovanou nádrž byly provedeny 2 varianty řízení nádrže při povodni. Varianta A bez předpouštění nádrže a varianta B s předpouštěním nádrže. Ve variantě A je držena hladina na úrovni plného zásobního objemu, jakmile je tato úroveň hladiny překročena, spodní výpusti jsou otevřeny na neškodný odtok. Při překročení bezpečnostního přelivu jsou spodní výpusti plynule zavírány a po opadnutí povodně plynule otvírány do výšky vody 0,5 m nad bezpečnostní přeliv. Hladina po povodni je opět držena na úrovni plného zásobního objemu. Naopak při variantě B je povoleno předpouštění spodními výpustěmi, které jsou otevřeny na neškodný odtok  $Q_{NE}$  a voda může klesat i pod úroveň maximálního zásobního objemu. Spodní výpusti jsou plynule zavírány až při překročení bezpečnostního přelivu do výšky vody 0,5 m nad bezpečnostní přeliv a po opadnutí povodně jsou opět spodní výpustě v tomto rozmezí plynule otvírány.

Nejprve jsou na Obr. 51 vykresleny jednotlivé transformace  $Q_{100}$ ,  $Q_{1.000}$  a  $Q_{10.000}$  z výpočtu deterministického řešení. V levé části vidíme průtoky povodní a jejich transformace a v pravé části jsou dosažené výšky vody v nádrži při daných transformacích.



**Obr. 51** Výsledky deterministického řešení průběhu transformací a průběhu výšek vody v nádrži pro velikosti povodňových vln  $Q_{100}$ ,  $Q_{1.000}$  a  $Q_{10.000}$  a pro 2 varianty řízení nádrže (A) a (B)

Na Obr. 51 pro jednotlivé povodňové vlny můžeme vidět výrazný rozdíl ve výsledcích podle manipulace se spodními výpustěmi. Pro  $Q_{100}$  s předpouštěním (varianta B) nebyl vůbec překročen neškodný odtok a hladina vody v nádrži byla po celou dobu pouze v zásobním objemu nádrže. Zásobní objem nádrže byl dokonce z velké míry vypuštěn, v tomto případě se takováto manipulace jeví jako nevhodná, a proto musí být předpouštění nádrže pouze v ojedinělých případech a na základě spolehlivých operativních předpovědí. V případě bez předpouštění (varianta A) došlo k nepatrnému překročení neškodného odtoku. Při kulminaci povodně došlo k zaplnění retenčního ovladatelného prostoru a následně došlo k transformaci povodně přes bezpečnostní přeliv, a tedy vystoupaní hladiny do retenčního prostoru neovladatelného.

U povodňové vlny  $Q_{1.000}$  se nádrž při plnění během povodně chovala velmi podobně jako při  $Q_{100}$ . Rozdíl nastal u varianty B s předpouštěním, kdy nedošlo k tak vysokému deficitu v zásobním prostoru nádrže (pokles oproti plnému  $V_Z$  cca 2,5 m), jako při  $Q_{100}$ . Ve variantě A bez předpouštění byl již výrazně překročen neškodný odtok a voda v nádrži stoupla asi o 50 cm výše než při  $Q_{100}$ .

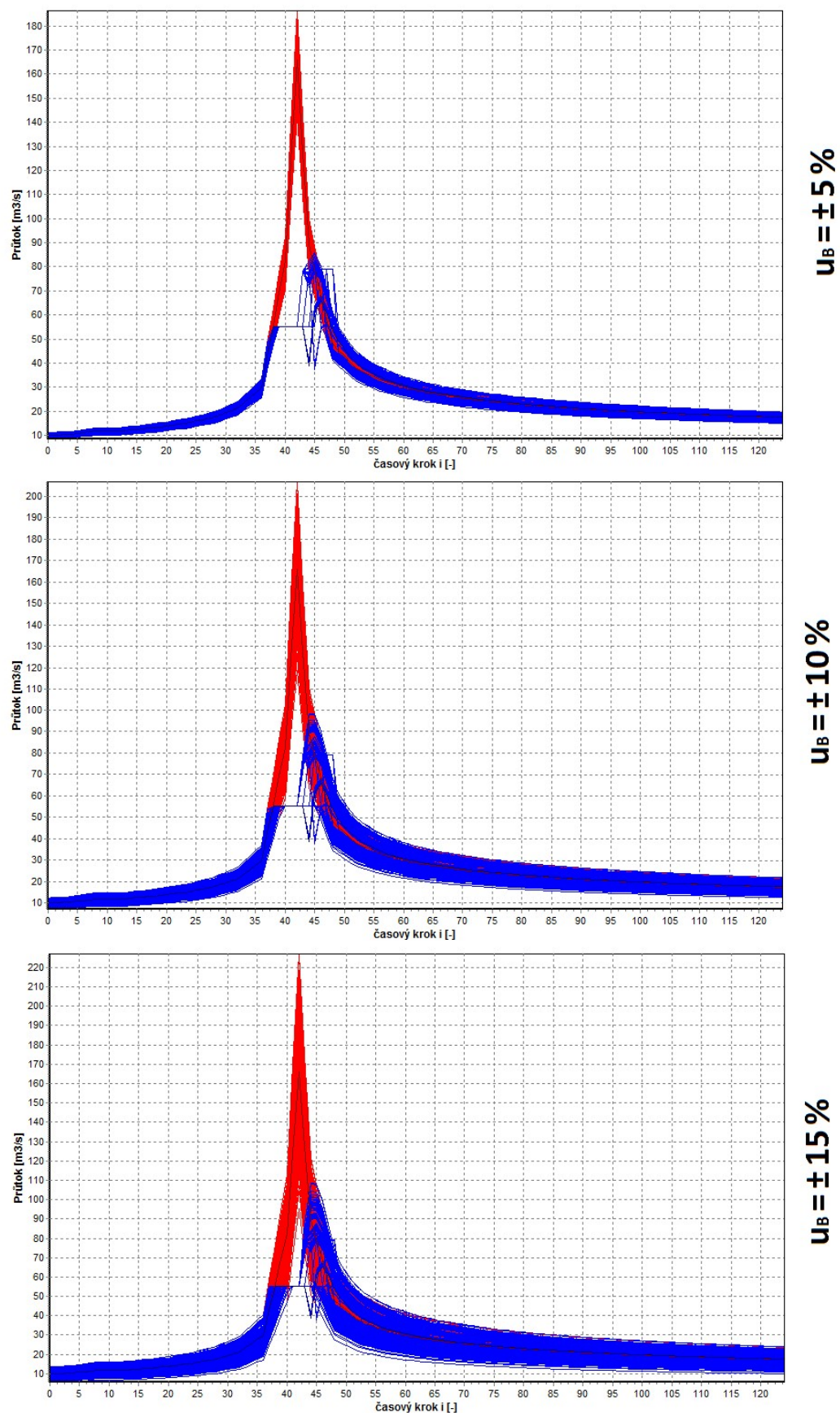
Naopak u povodňové vlny  $Q_{10.000}$  byl v obou variantách překročen neškodný odtok a ve variantě A bez předpouštění byla atakována i hranice kontrolní maximální hladiny KMH, jinými slovy došlo téměř k přelítí nádrže.

Na následujících Obr. 52 až Obr. 63 je vykreslen stochastický průběh transformací z vyvíjeného softwaru TRANSFORM\_WAVE. Můžeme vidět 300 průběhů transformací povodňových vln a následně 300 průběhů výšek vody v nádrži pro povodňové vlny  $Q_{100}$  (Obr. 52 až Obr. 55),  $Q_{1.000}$  (Obr. 56 až Obr. 59) a  $Q_{10.000}$  (Obr. 60 až Obr. 63) vždy se vstupní standardní nejistotou povodně  $u_B = \pm 5, \pm 10, \pm 15 \%$ . Takto zvolená nejistota mj. při generování svojí velikostí (kulminací) zahrne i jiné typy povodňové vlny než zvolený typ dle klasické regrese bez rozlišení sezonality. Pro každou tuto transformaci jsou zobrazeny průběhy pro řízení nádrže varianty A a poté varianty B. V těchto obrázcích jsou červeně zobrazeny generované průběhy přítoků (povodňových vln) do nádrží, modře výsledky průběhů odtoků (transformovaných vln) z nádrže a zeleně průběhy plnění a prázdnění (dosažené výšky vody) nádrže.

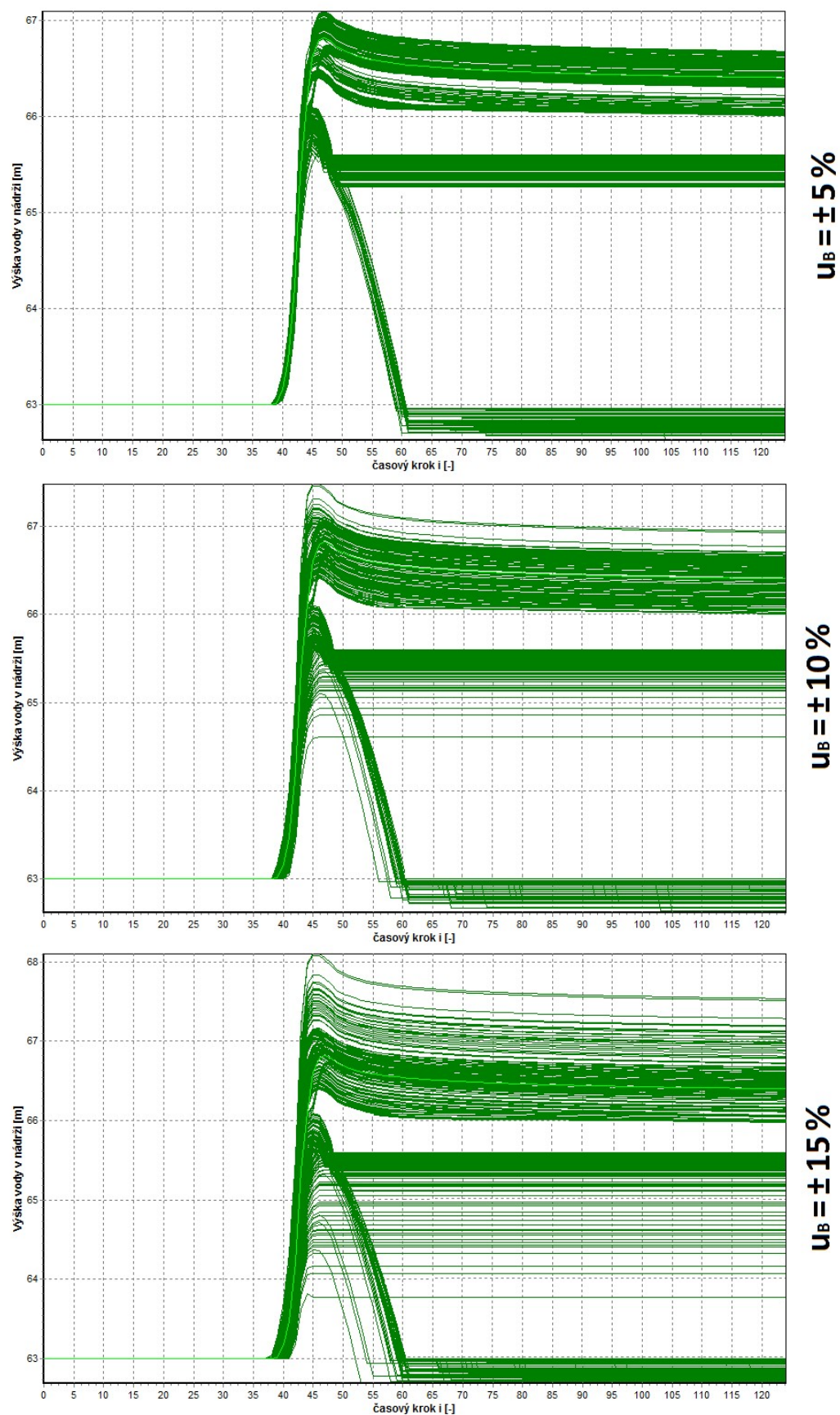
#### POZNÁMKA:

Odlišným odstínem každé ze zmíněných barev jsou zobrazeny průběhy deterministického řešení.

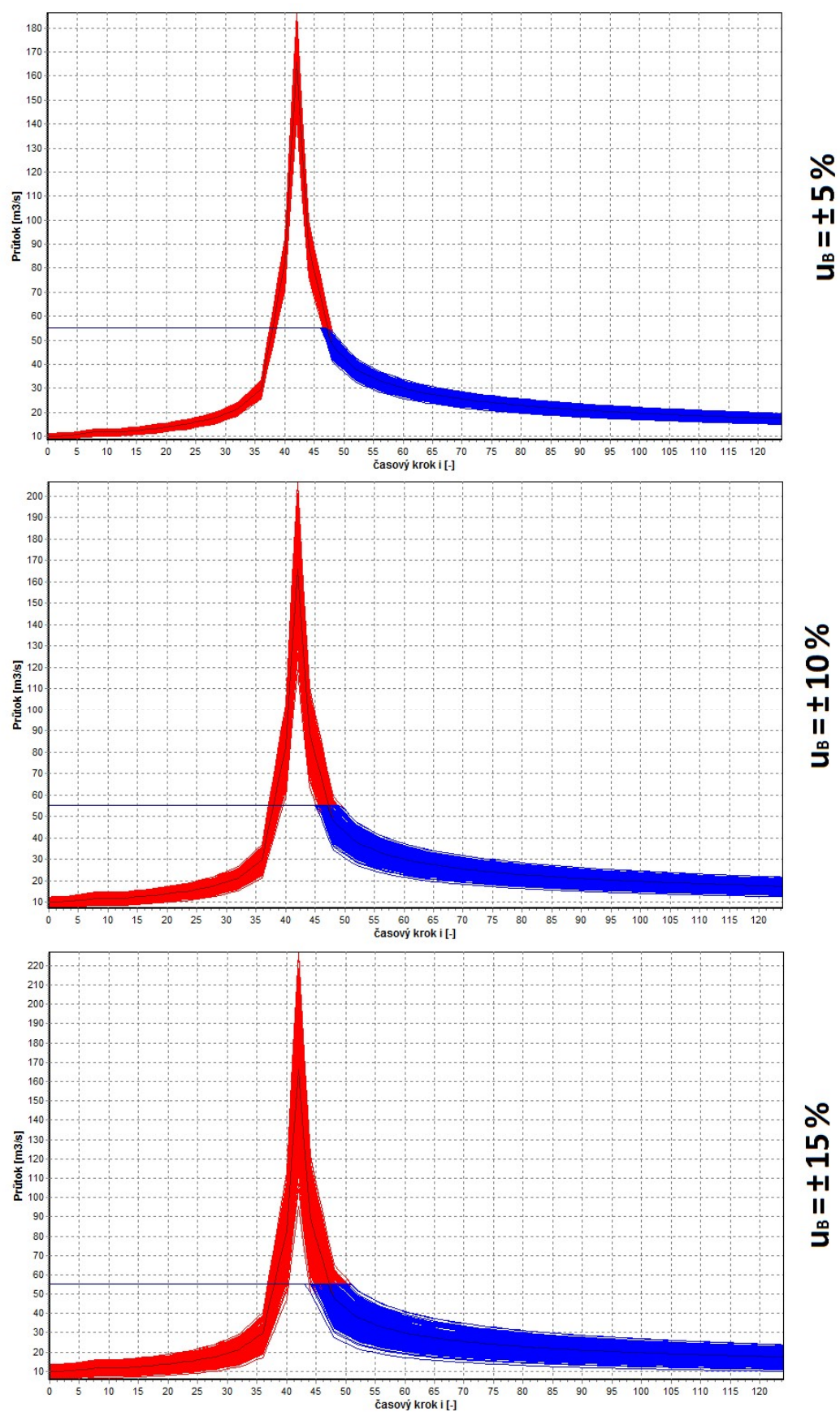




**Obr. 52** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{100}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže A

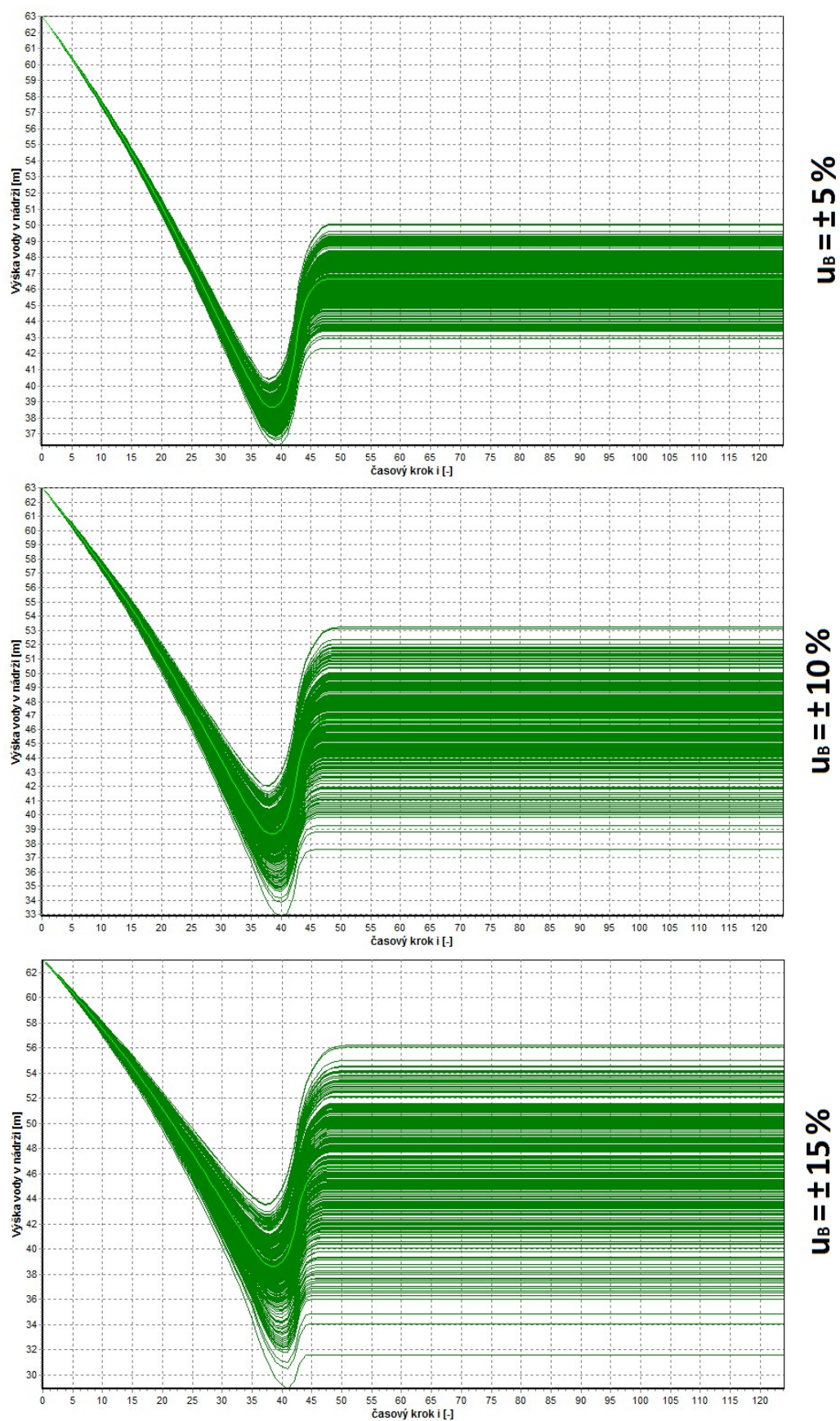


**Obr. 53** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{100}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže A

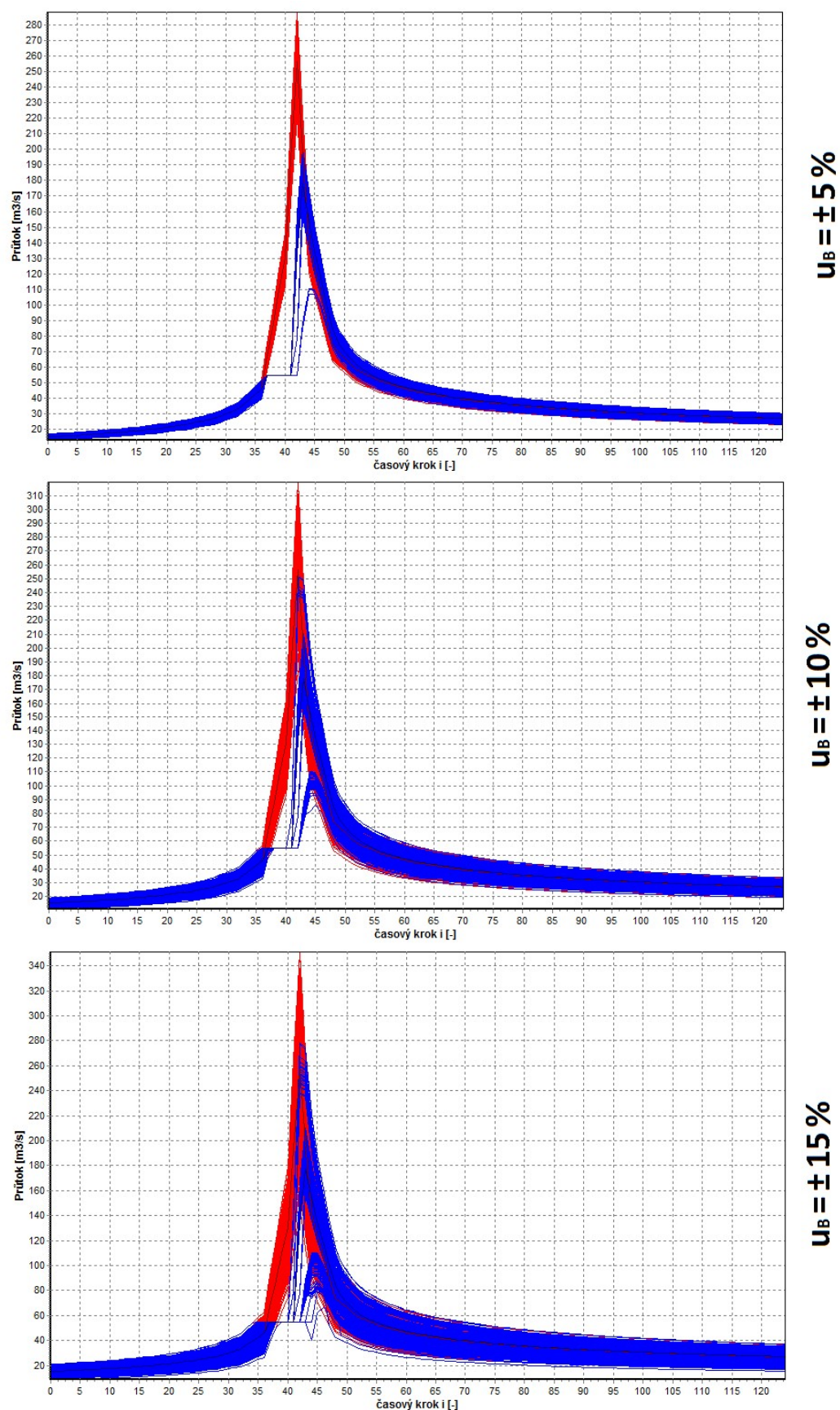


**Obr. 54** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{100}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže B

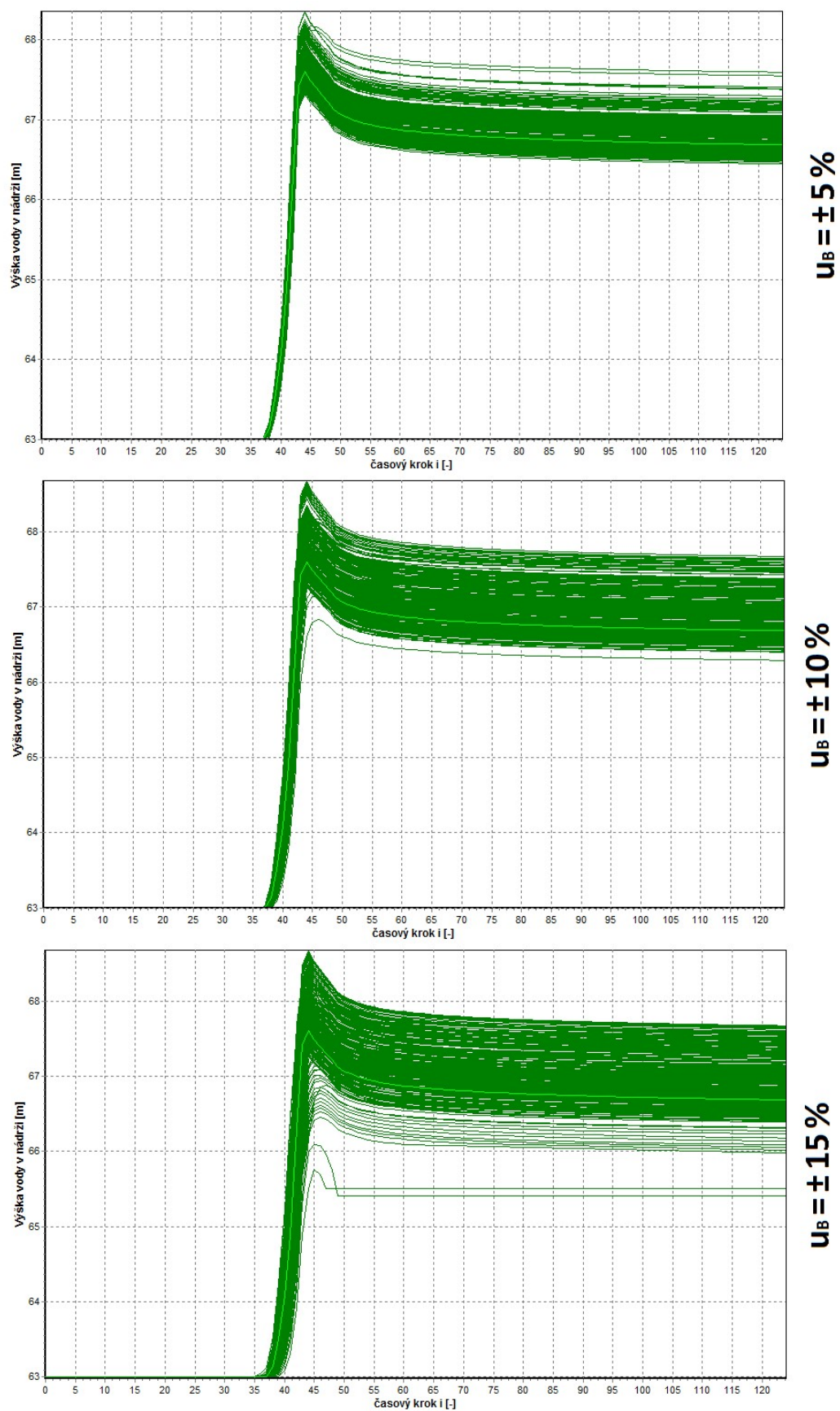




**Obr. 55** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{100}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže B

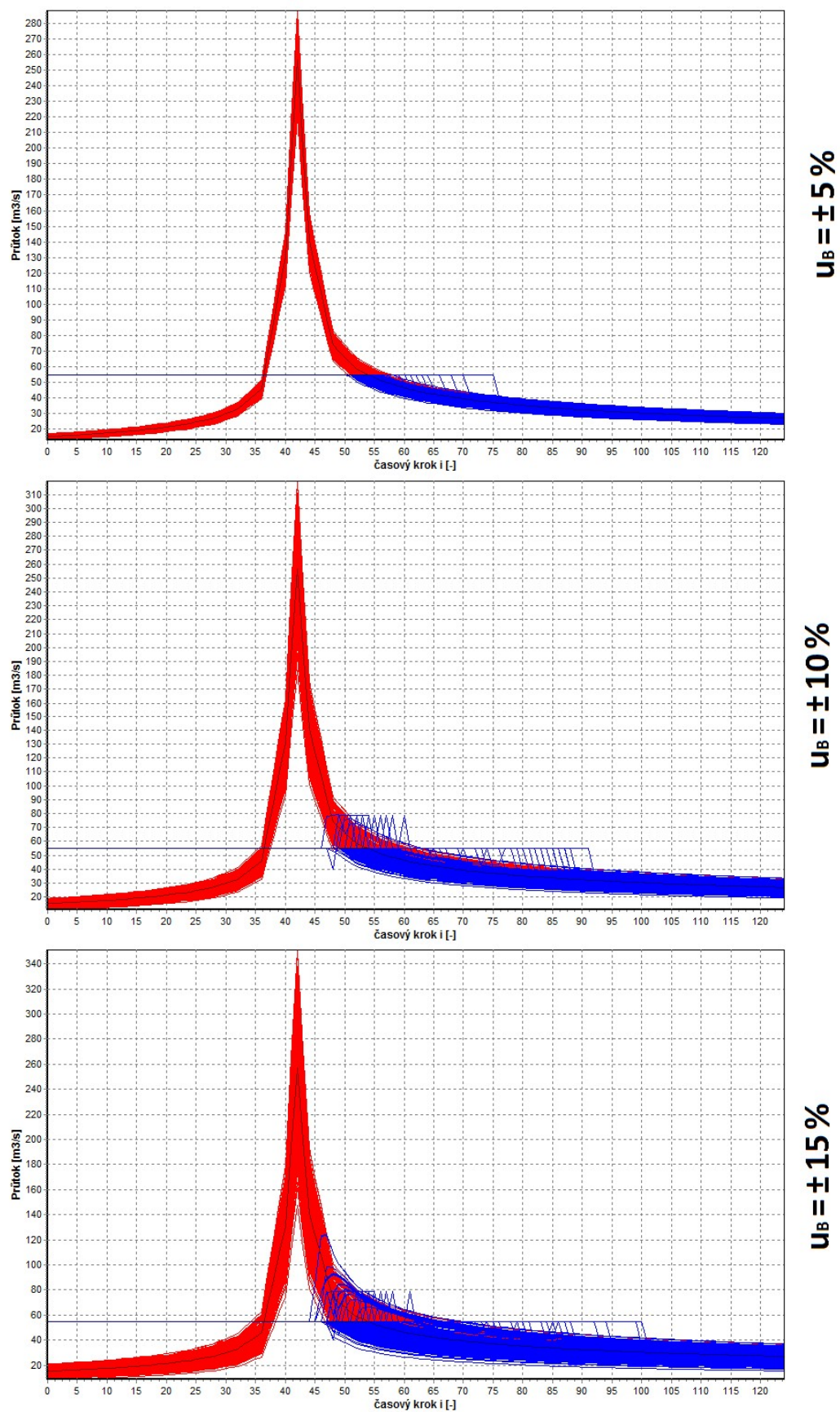


**Obr. 56** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže A

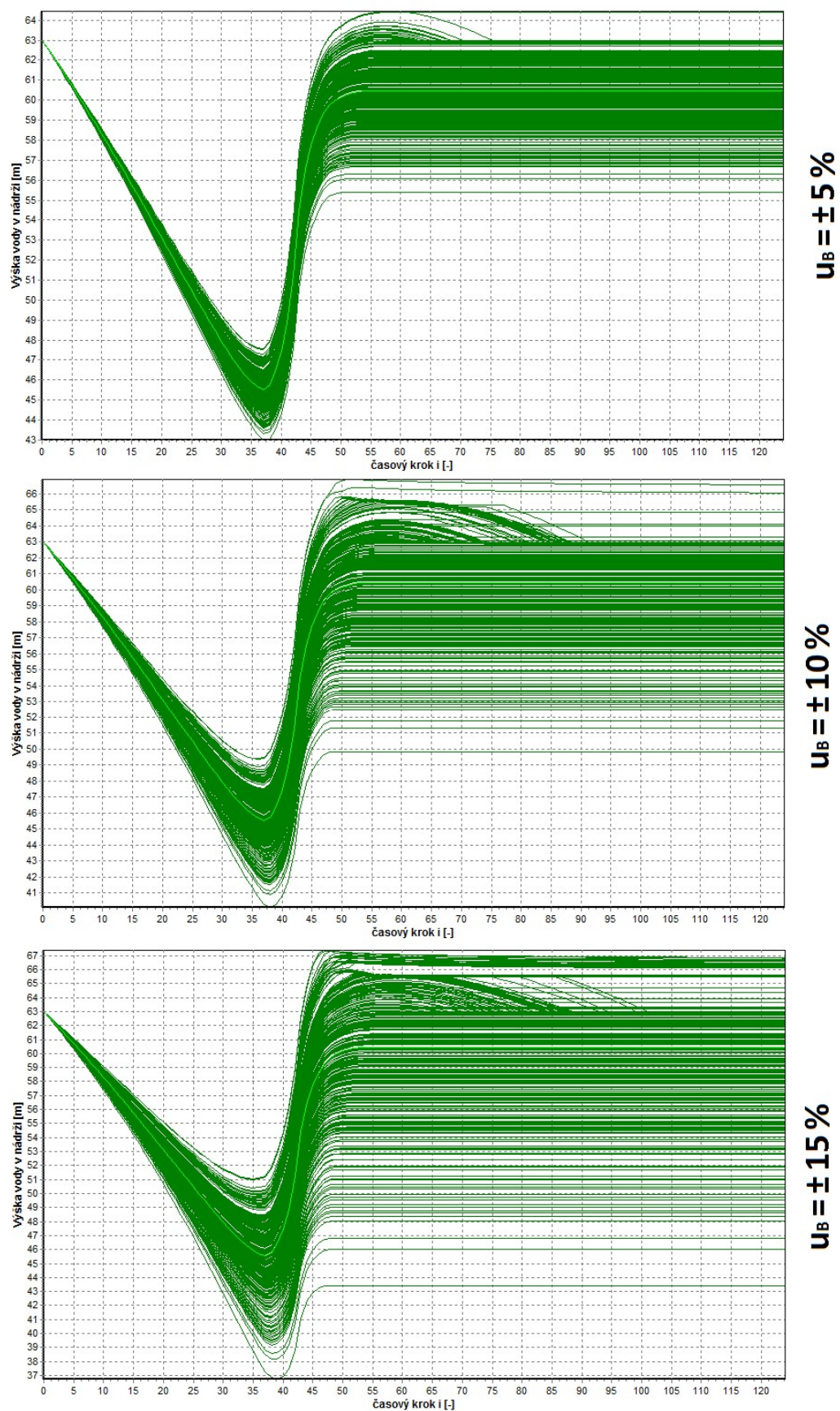


**Obr. 57** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže A



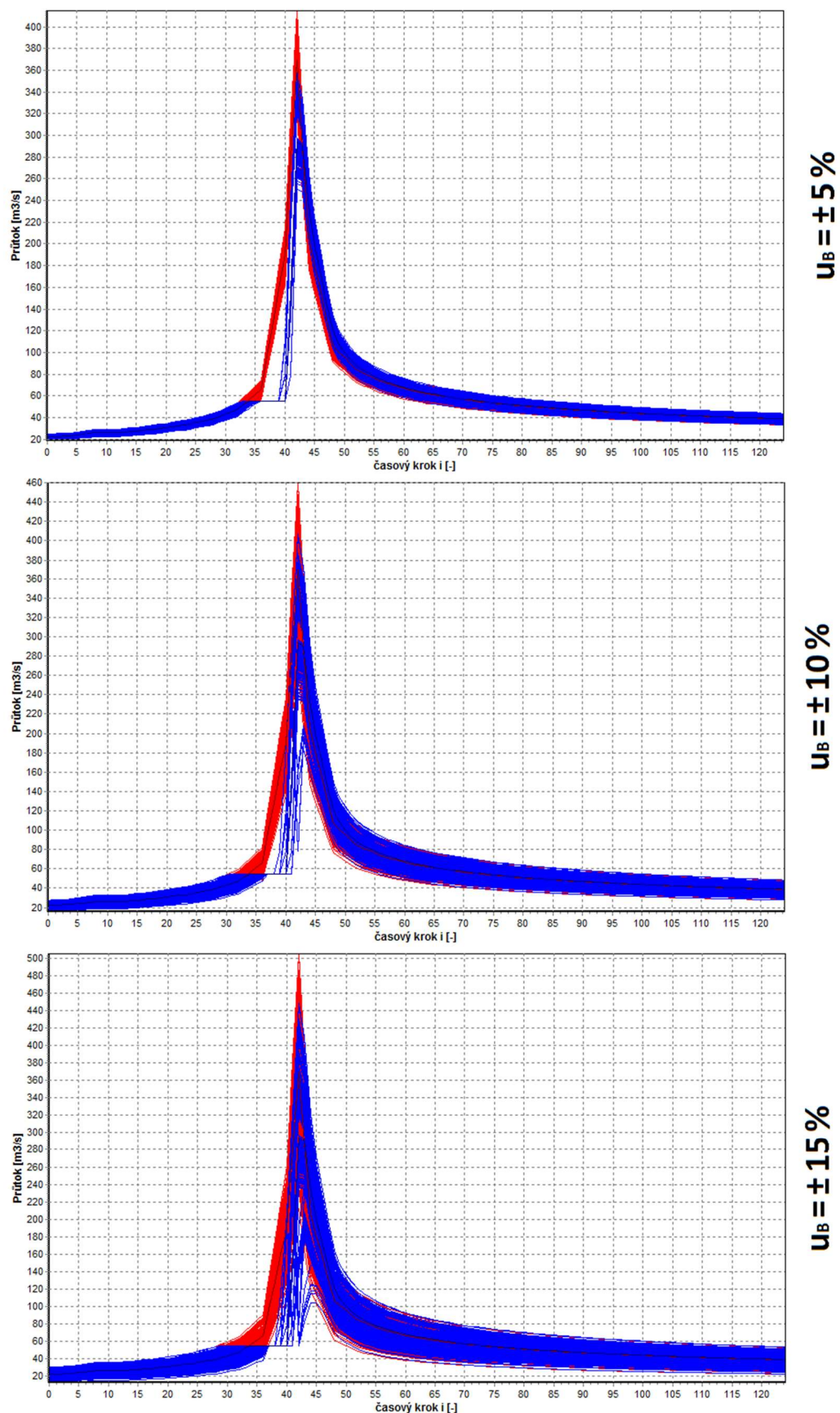


**Obr. 58** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{1,000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže B

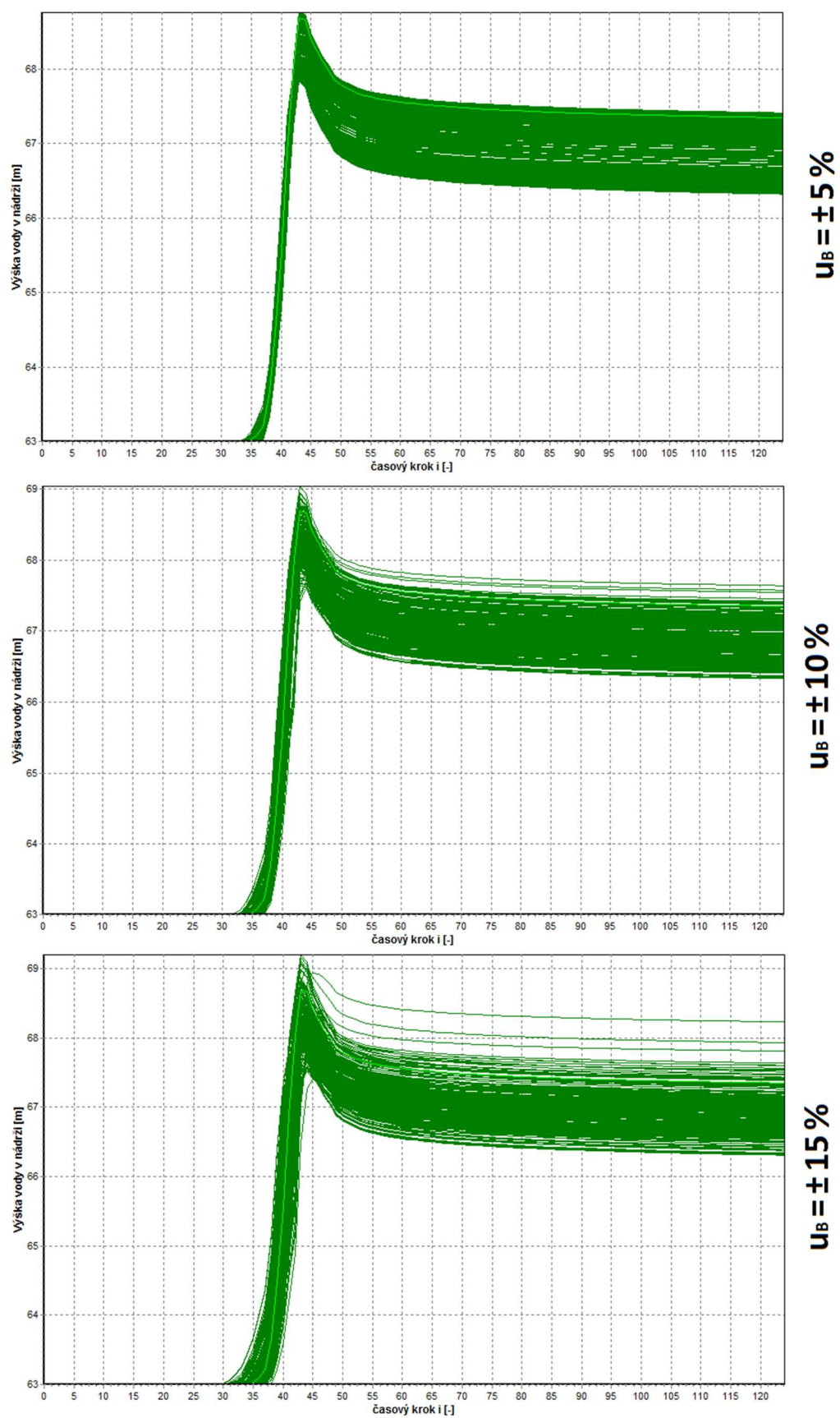


**Obr. 59** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže B

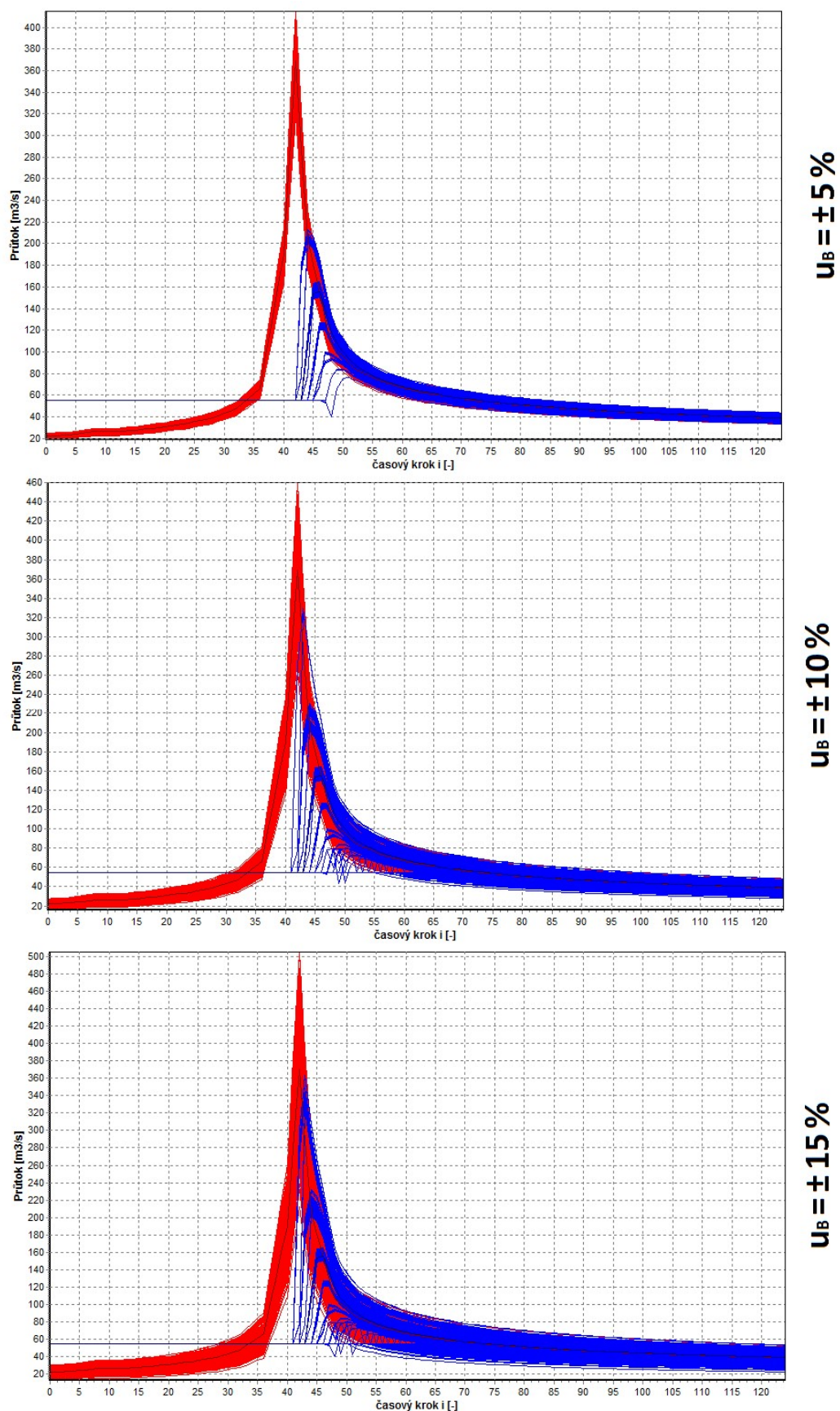




**Obr. 60** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{10.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže A

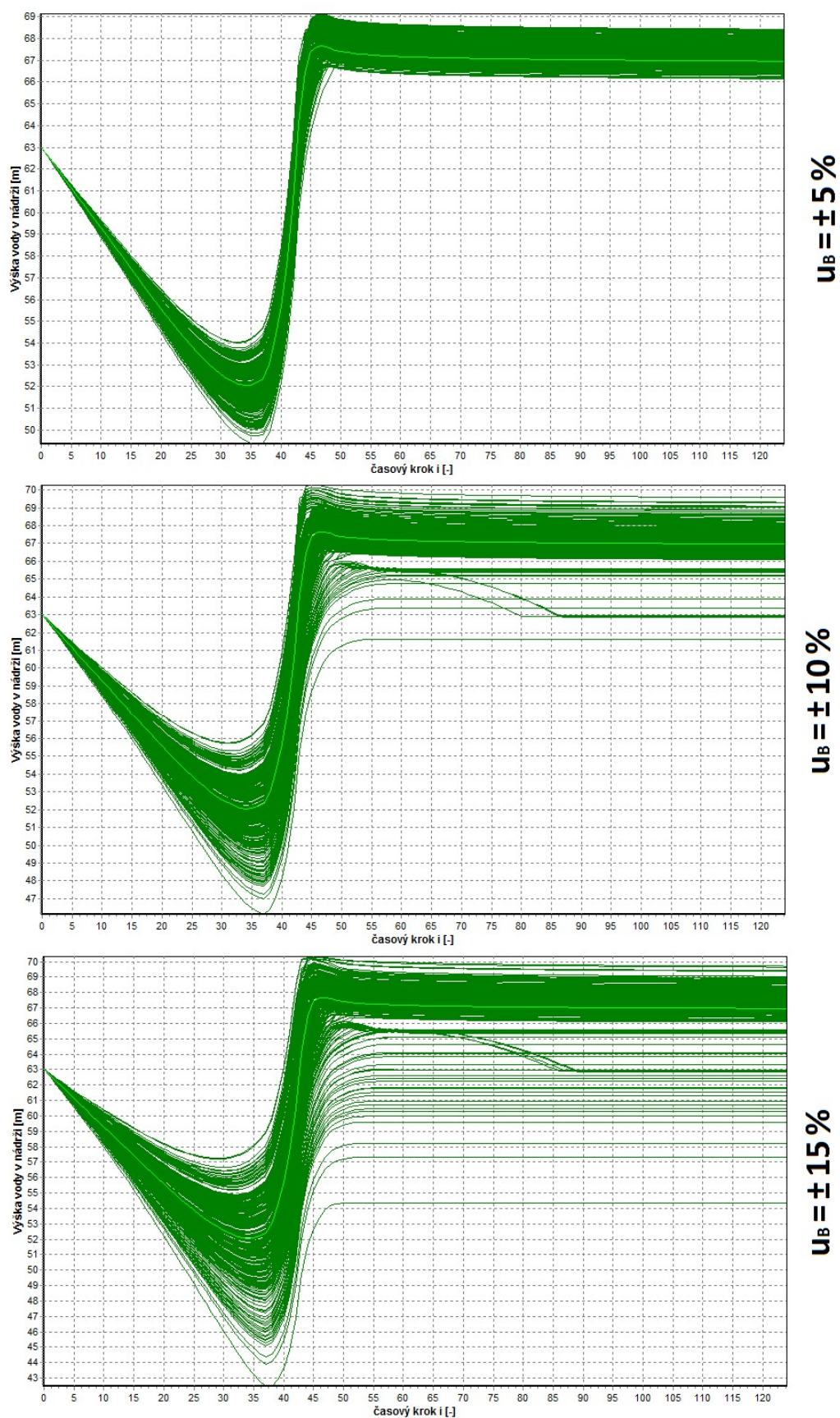


**Obr. 61** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{10.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže A



**Obr. 62** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{10.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže B





**Obr. 63** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{10,000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  při variantě řízení nádrže B

Z předchozích Obr. 52 až Obr. 63 výše je vidět zřetelný vliv vstupních nejistot na povodňových vlnách a na konečných výsledcích v podobě průběhů transformovaných povodní a dosažených výšek vody v nádrži. Dále je pozorovatelný větší rozptyl výsledků s rostoucí nejistotou ve všech případech.

U povodňových vln  $Q_{1.000}$  ve variantě B nastalo v několika opakováních překročení neškodného odtoku pro vstupní nejistotu  $u_B = \pm 10 \%$  a  $\pm 15 \%$  a tudíž došlo k překročení bezpečnostního přelivu (překročení retenčního prostoru ovladatelného). Naopak v deterministickém řešení k tomuto překročení nedošlo, viz Obr. 58 a Obr. 59.

Na obrázcích transformací, konkrétně na Obr. 52, 56, 58, 60 a 62 se můžou zdát jednotlivé průběhy transformací poněkud zarážející v podobě vytvořených několika svazků transformací a tedy přeskakování, které je ale způsobeno délkou časového kroku 6 hodin. Jinými slovy, když jednotlivé průběhy překročily bezpečnostní přeliv v jiném časovém kroku, byl mezi nimi hned rozdíl minimálně 6 hodin, to zapříčinilo skoky v jednotlivých kulminacích transformovaných povodní. Kdyby byl časový krok jemnější, tak by nedošlo k vytvoření těchto svazků a kulminace transformovaných povodní by byly rozprostřeny plynuleji mezi sebou.

#### POZNÁMKA:

Časový krok 6 hodin byl určen na základě vstupních dat, kdy celková délka povodňové vlny byla 1 měsíc a délka kroku 1 den. Délka kroku byla zjemněna z 24 hodin na 6 hodin z důvodu přesnosti výpočtu a také kvůli problému v odstavci výše. Na druhou stranu se tím prodloužila doba výpočtu. Navíc, při řízení vodní nádrže během povodně je uvažováno s manipulací spodními výpustěmi v časovém kroku, a proto tento časový interval musí být vhodně nastaven.

Kompletní výsledky provedené analýzy jsou vyhodnoceny v následujících tabulkách, konkrétně v Tab. 9 jsou zhodnoceny kulminace průtoků testovaných povodní po transformaci a v Tab. 10 jsou zhodnoceny kulminace výšek vody v nádrži testovaných povodní po transformaci.

**Tab. 9** Výsledky středních hodnot a směrodatných odchylek kulminací průtoků [ $m^3 s^{-1}$ ] testovaných povodní po transformaci

$Q_{kulm} [m^3 s^{-1}]$	VARIANTA A bez předpouštění				VARIANTA B s předpouštěním			
	determin.	$u_B = \pm 5 \%$	$u_B = \pm 10 \%$	$u_B = \pm 15 \%$	determin.	$u_B = \pm 5 \%$	$u_B = \pm 10 \%$	$u_B = \pm 15 \%$
$Q_N$								
$Q_{100}$	65.264	75.429 $\pm 12.027$	76.789 $\pm 18.038$	76.898 $\pm 25.841$	55.000	55.000 $\pm 0.000$	55.000 $\pm 0.000$	55.000 $\pm 0.000$
$Q_{1.000}$	177.671	176.671 $\pm 22.659$	172.111 $\pm 62.536$	168.576 $\pm 94.067$	55.000	55.000 $\pm 0.000$	56.268 $\pm 10.708$	58.801 $\pm 20.877$
$Q_{10.000}$	294.301	303.285 $\pm 51.456$	303.158 $\pm 84.726$	305.981 $\pm 113.346$	155.216	149.930 $\pm 51.127$	149.946 $\pm 98.589$	153.803 $\pm 146.913$

V Tab. 9 můžeme vidět výsledky kulminací testovaných povodní s různými vstupními nejistotami a dvěma variantami řízení. Je zřetelný výrazný vliv vstupní standardní nejistoty povodňové vlny na výsledky kulminací průtoků. Červeně jsou zobrazeny výsledky, kde je překročen neškodný odtok. Z výsledků je patrné, že pro variantu A je vždy překročen neškodný odtok a ve variantě B s předpouštěním není překročen neškodný odtok pouze pro stoletou povodeň a pro tisíciletou povodeň bez vstupních nejistot a s nejnižší testovanou nejistotou  $u_B = \pm 5 \%$ .

Pro  $Q_{100}$  ve variantě B můžeme vidět, že rozšířená směrodatná odchylka dosahuje nulových hodnot. To je způsobeno tím, že transformace povodňové vlny pro všechna opakování byla provedena pouze spodními výpustěmi. Obdobně jako všechny stejné dosažené hodnoty kulminací průtoků transformovaných povodní  $55,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ve variantě B jsou způsobeny tím, že bylo před vypouštěním na  $Q_{NE}$ , tedy zmiňovaných  $55,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a v dalších krocích díky předpouštění nebyl překročen bezpečnostní přeliv v žádném opakování.

Poněkud zvláště se mohou zdát výsledné hodnoty středních hodnot v porovnání bez nejistot a s nejistotami dané povodně. Např. pro povodňovou vlnu  $Q_{100}$  a variantu A, kdy deterministické řešení má maximální kulminaci přes  $65 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , tak se vstupní nejistotou jsou pak střední hodnoty kulminací přes  $75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Tento rozdíl v odlišnosti středních hodnot je způsoben tím, že i při vygenerovaných nižších povodňových vlnách neklesnou kulminace transformací pod  $55,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a tudíž je výsledná střední hodnota ze všech transformací vyšší než při deterministickém řešení. Ovšem pro transformace povodňových vln  $Q_{1.000}$  a  $Q_{10.000}$  je tento rozdíl středních hodnot pravděpodobně důsledkem velikosti zvoleného časového kroku, tedy vytvořenými svazky kulminací, jak bylo popsáno výše.

**Tab. 10** Výsledky středních hodnot a směrodatných odchylek kulminací výšek vody v nádrži [m] testovaných povodní po transformaci

$H_{kulm}$ [m]	VARIANTA A bez předpouštění				VARIANTA B s předpouštěním			
	determin.	$u_B = \pm 5 \%$	$u_B = \pm 10 \%$	$u_B = \pm 15 \%$	determin.	$u_B = \pm 5 \%$	$u_B = \pm 10 \%$	$u_B = \pm 15 \%$
$Q_N$	66.816	66.426 $\pm 0.938$	66.312 $\pm 1.197$	66.234 $\pm 1.625$	63.000	63.000 $\pm 0.000$	63.000 $\pm 0.000$	63.000 $\pm 0.000$
$Q_{1.000}$	67.601	67.725 $\pm 0.401$	67.802 $\pm 0.641$	67.808 $\pm 0.891$	63.000	63.030 $\pm 0.309$	63.308 $\pm 1.504$	63.625 $\pm 2.344$
$Q_{10.000}$	68.687	68.263 $\pm 0.533$	68.256 $\pm 0.567$	68.256 $\pm 0.677$	67.644	67.843 $\pm 1.135$	67.693 $\pm 2.111$	67.478 $\pm 3.360$

V Tab. 10 můžeme vidět výsledky kulminací výšek vody v nádrži s různými vstupními nejistotami a dvěma variantami řízení. Také zde je patrný vliv vstupní standardní nejistoty povodňové vlny na výsledky kulminací výšek vody v nádrži. Pokud porovnáme dosažené výsledky s velikostí celkového retenčního prostoru nádrže  $V_R$ , který je  $8,337 \text{ mil. m}^3$  na úrovni  $468,45 \text{ m n. m.}$ , což odpovídá výšce vody v nádrži  $67,0 \text{ m}$ , tak vidíme, že stávající

retenční objem nádrže  $V_R$  vyhoví pouze na  $Q_{100}$  ve variantě A bez vstupních nejistot a ve variantě B pro  $Q_{100}$  a  $Q_{1.000}$  včetně nejistot. Zbylé výsledky jsou v Tab. 10 zobrazeny červeně, tedy ty, u kterých byl překročen stávající retenční prostor nádrže  $V_R$ . Naopak při porovnání výsledků na kontrolní maximální hladinu KMH, která je na kótě 470,45 m n. m., což odpovídá výšce vody v nádrži 69,0 m, nádrž ve většině případů vyhoví. Podle vyhodnocení v Tab. 10 nevyhoví pouze ve variantě B pro  $Q_{10.000}$  při vstupní nejistotě  $u_B = \pm 10\%$  a  $\pm 15\%$ , v těchto případech by nastalo přelití samotné hráze. Tyto výsledky jsou v Tab. 10 zvýrazněny tučně červeně.

Za zmínku také stojí výrazný rozdíl ve výsledcích rozšířených nejistot kulminací výšek v nádrži mezi řízením nádrže ve variantě A a B, který je patrný u  $Q_{1.000}$  a  $Q_{10.000}$  v Tab. 10. To je způsobeno tím, že ve variantě B s předpouštěním dochází k výraznému rozdílu již v průběhu předpouštění. Konkrétně např. ve variantě A pro  $Q_{10.000}$  je ještě v kroku 30 stále konstantní výška vody v nádrži 63 m pro všechna opakování a všechny testované vstupní nejistoty, viz Obr. 61. Naopak ve variantě B pro  $Q_{10.000}$  je již v kroku 30 výrazný rozdíl v dosažených výškách vody v nádrži mezi jednotlivými opakováními, který je zapříčiněn právě kvůli předpouštění, viz Obr. 63.

V Tab. 11 je detailněji vyhodnoceno překročení kulminačních výšek během transformací na kontrolní maximální hladinu KMH pro generované povodňové vlny  $Q_{10.000}$ . Vyhodnocení je uvedeno v % překročení z 300 proběhlých transformací.

**Tab. 11** Překročení KMH nádrže [%] během transformace povodňové vlny  $Q_{10.000}$

	VARIANTA A bez předpouštění			VARIANTA B s předpouštěním		
	$u_B = \pm 5\%$	$u_B = \pm 10\%$	$u_B = \pm 15\%$	$u_B = \pm 5\%$	$u_B = \pm 10\%$	$u_B = \pm 15\%$
$Q_{10.000}$	0.00	0.33	2.00	4.00	8.67	15.67

V Tab. 11 můžeme pozorovat, že nastalo přelití hráze v ojedinělých případech i ve variantě A bez předpouštění. Konkrétně 1x pro vstupní standardní nejistoty  $u_B = \pm 10\%$  a 6x pro vstupní standardní nejistoty  $u_B = \pm 15\%$ . Naopak ve variantě B došlo k výraznějšímu překročení KMH než ve variantě A. Konkrétně pro vstupní standardní nejistoty  $u_B = \pm 5\%$  nastalo přelití nádrže ve 12 případech, pro  $u_B = \pm 10\%$  ve 26 případech a pro  $u_B = \pm 15\%$  ve 47 případech. Z dosažených výsledků je zřejmé, že při povodních  $Q_{10.000}$  ve variantě B vzniká větší riziko přelití nádrže než ve variantě A. To je způsobeno tím, že při kulminacích generovaných povodňových vln (cca časový krok 42) je výška vody v nádrži v této variantě výrazně níže, viz Obr. 62 a Obr. 63, než ve variantě A bez předpouštění nádrže, viz Obr. 60 a Obr. 61. To znamená, že při této nižší výšce vody v nádrži při kulminaci povodně je pak rychlejší nárůst vody v nádrži, což je způsobeno čarou zatopených objemů.

Jak bylo řečeno, celkový ochranný objem nádrže Vír I  $V_R$  je 8,337 mil. m<sup>3</sup> na úrovni 468,45 m n. m. Pokud bychom chtěli navrhnout retenční prostor nádrže např. na povodňovou vlnu  $Q_{1.000}$  se vstupní nejistotou 10 % bez předpouštění nádrže, jak bylo provedeno ve variantě A a zároveň nezasahovali do velikosti zásobního prostoru, pak by byl podle Tab. 10 retenční prostor na úrovni  $67,80 \pm 0,64$  m, tedy v rozmezí hodnot 67,16 m až 68,44 m. Na stranu bezpečnou je žádoucí přiklonit se na horní mez intervalu 68,44 m. Tato hodnota by odpovídala novému celkovému retenčnímu prostoru cca 11,842 mil. m<sup>3</sup>, tedy navýšení celkového retenčního prostoru o 3,505 mil. m<sup>3</sup> neboli o 42 %. Pokud bychom uvažovali s variantou B předpouštěním nádrže pro povodňovou vlnu  $Q_{1.000}$ , pak by byl stávající retenční prostor dostačující pro všechny testované vstupní nejistoty.

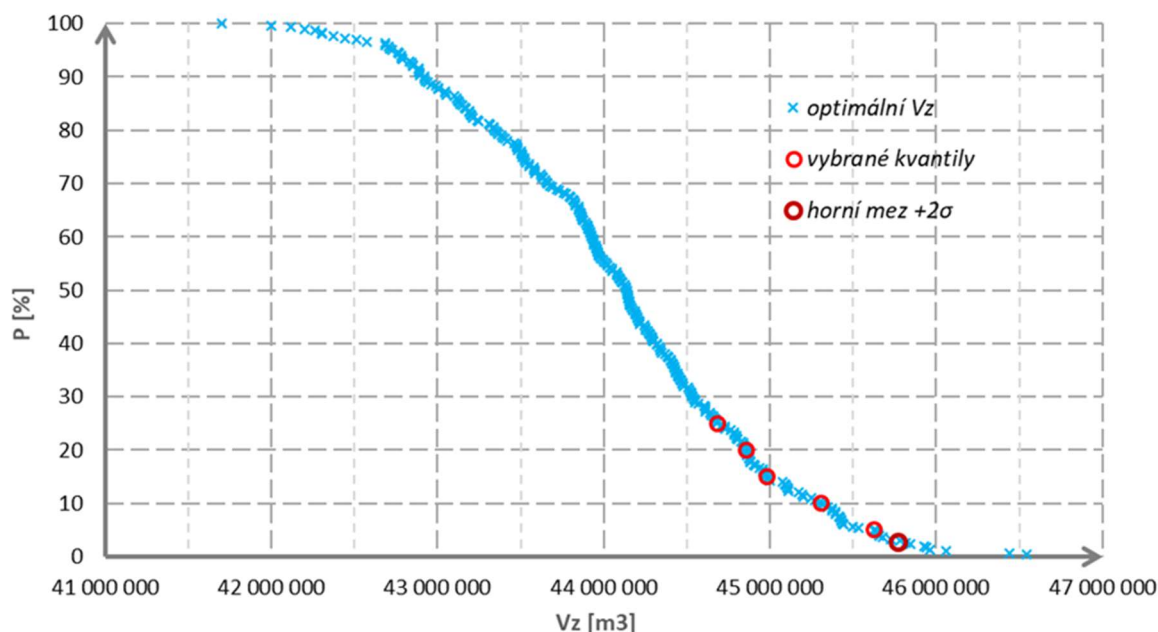
#### 6.4 Komplexní řešení funkčních prostorů nádrže

V této kapitole pro komplexní řešení funkčních prostorů nádrže v podmínkách nejistot je nejprve nutné vypočítat optimalizovaný zásobní objem nádrže pomocí programu UNCE\_RESERVOIR a následně stanovit retenční objem nádrže přes transformace povodňových vln pomocí programu TRANSFORM\_WAVE. Pro aplikaci byl zvolen profil VD Vír I, protože u tohoto profilu byly provedeny izolovaně výpočty zásobního i retenčního prostoru v kapitolách výše.

Výsledky optimálních zásobních objemů byly použity z kapitoly 6.2 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení menší než 100 %, konkrétně pro řešení s očekávanými vstupními nejistotami ( $u_B$  na přítoku  $\pm 3$  %, batygrafických křivkách  $\pm 5$  %, na výparu z vodní hladiny  $\pm 4$  % a průsaku tělesem hráze  $\pm 3$  % pro profil Vír I) pro počet opakování 300. Zásobní objem nádrže byl tedy optimalizován pro požadovaný odtok  $O_P = 2,305 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a zabezpečení podle trvání  $P_T \geq 99,5$  %. V další části vyhodnocení bude pracováno s výsledky z průběhu plnění a prázdnění nádrže, jak je vykresleno na Obr. 46 a s pravděpodobností překročení, který je modrou barvou vykreslen na Obr. 47. Z provedené analýzy byla doporučena relativně bezpečná konkrétní hodnota optimálního zásobního objemu nádrže Vír I, která odpovídá 45,770 mil. m<sup>3</sup>.

Za účelem zjištění, jak může navýšení zásobního objemu nádrže ovlivnit transformaci povodňové vlny a změnu retenčního prostoru nádrže, bude uvažováno s více variantami návrhu zásobního objemu nádrže. Teoreticky software UNCE\_RESERVOIR umožňuje podle počtu nastavených opakování uložit všechny optimální zásobní objemy a poté ke každému z nich pomocí softwaru TRANSFORM\_WAVE vypočítat retenční prostor nádrže pro libovolný počet opakování. Za účelem zjednodušení a zkrácení doby výpočtu bylo pro komplexní řešení funkčních objemů vybráno jen několik optimálních zásobních objemů z 300 řešení s očekávanými vstupními nejistotami. Konkrétně byly vybrány

výsledné optimální zásobní objemy 75 %, 80 %, 85 %, 90 % a 95 % kvantilů a horní mez výsledné rozšířené nejistoty  $+2\sigma$ , viz Obr. 64.



**Obr. 64** Vybrané optimální hodnoty  $V_z$  z pravděpodobnosti překročení výsledných optimalizovaných zásobních objemů nádrže Vír I

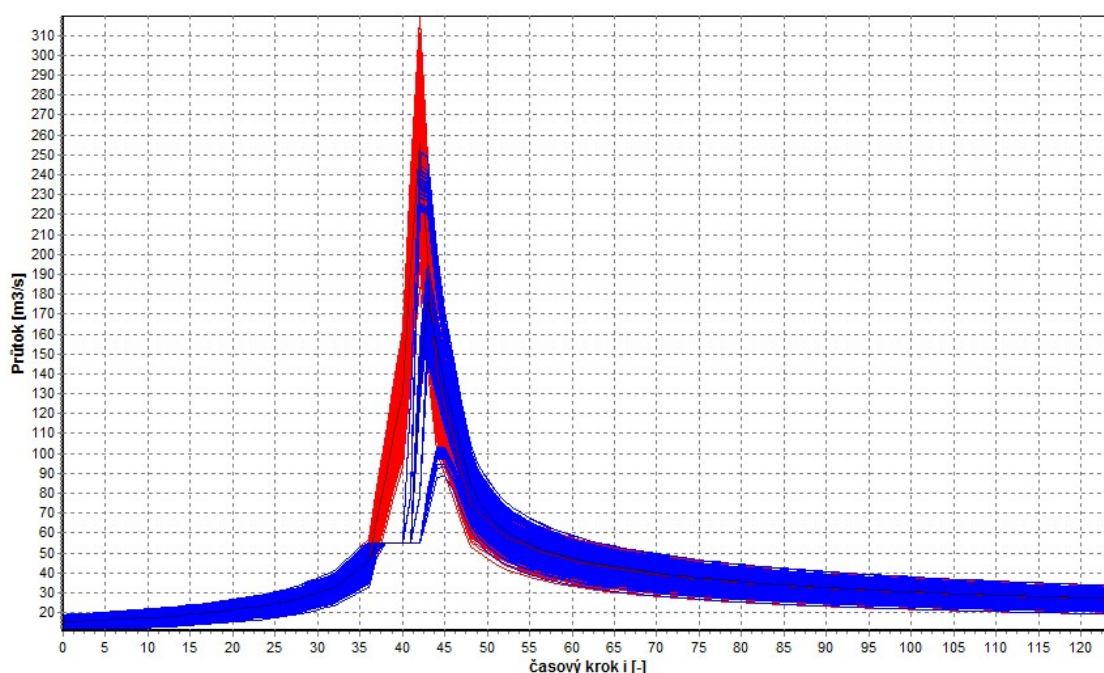
Dále pro vybrané optimální hodnoty  $V_z$  nádrže Vír I byla zpracována Tab. 12, ve které je uveden přesný stanovený optimální zásobní objem  $V_{Zoptim}$  a odpovídající výška vody v nádrži  $h_{Vz}$ . Je jasné, že s rostoucím kvantilem roste hodnota  $V_{Zoptim}$ , a tudíž i výška vody v nádrži  $h_{Vz}$ . Dále je tabulka doplněna o sloupec  $V_{Zoptim} + V_{ST.N.}$ , kde je k vypočtenému optimálnímu zásobnímu objemu přičten objem stálého nadržení. Nakonec je doplněn retenční prostor ovladatelný  $V_{RO}$ , tedy jeho pokles v důsledku nárůstu  $V_{Zoptim}$  pro konstantní retenční výšku vody v nádrži  $h_{RO}$ .

**Tab. 12** Vybrané optimální hodnoty  $V_{Zoptim}$  [m³] a jejich odpovídající výška vody v nádrži včetně omezení retenčního prostoru ovladatelného

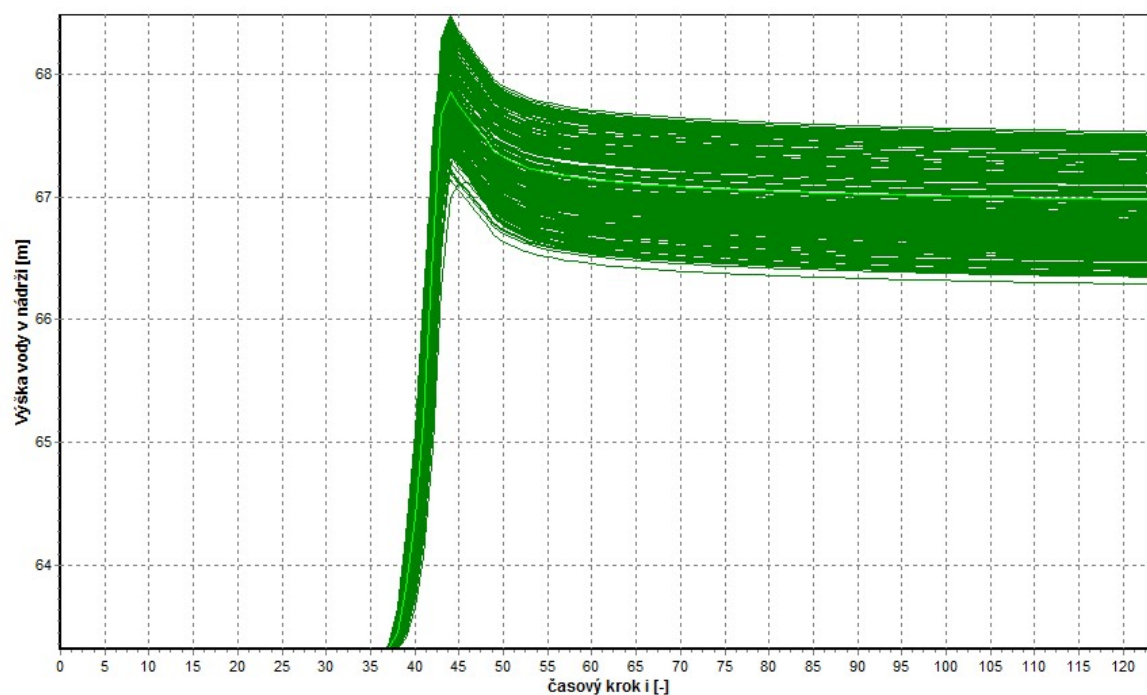
	výška $h_{Vz}$	$V_{Zoptim}$	$V_{Zoptim} + V_{ST.N.}$	výška $h_{RO}$	$V_{RO}$
	[m]	[m³]	[m³]	[m]	[m³]
současný stav	63.00	44 056 000	47 856 000	65.60	5 286 000
75% kvantil $V_z$	63.32	44 682 300	48 482 300	65.60	4 659 700
80% kvantil $V_z$	63.41	44 858 400	48 658 400	65.60	4 483 600
85% kvantil $V_z$	63.47	44 984 800	48 784 800	65.60	4 357 200
90% kvantil $V_z$	63.64	45 310 700	49 110 700	65.60	4 031 300
95% kvantil $V_z$	63.79	45 628 200	49 428 200	65.60	3 713 800
h. mez $V_z(+2\sigma)$	63.90	45 770 228	49 570 228	65.60	3 571 772



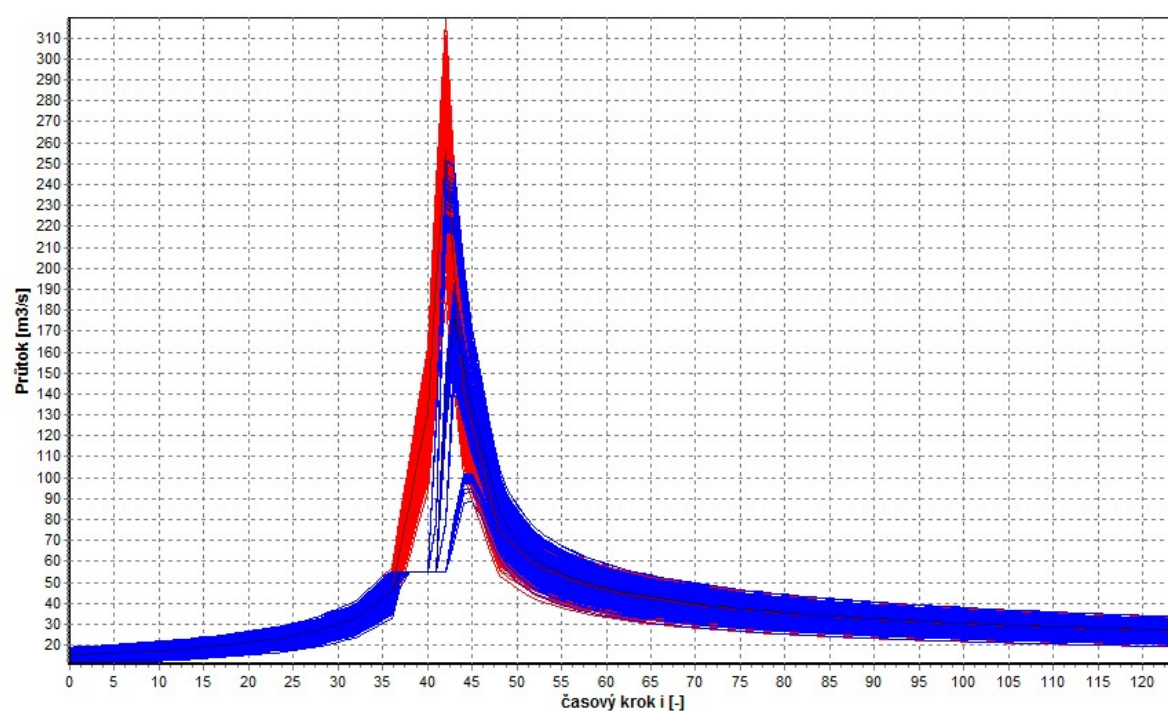
Pro vybrané hodnoty optimálních  $V_Z$  je ověřen a vyhodnocen retenční prostor nádrže v podmínkách nejistot. Z důvodu navýšení  $V_Z$  a vlivu na  $V_{RO}$  byly provedeny transformace nejistých povodňových vln. Konkrétně byla vybrána povodňová vlna  $Q_{1.000}$  se vstupní standardní nejistotou  $u_B = \pm 10 \%$ . Byla zvolena varianta A bez předpouštění nádrže a počet generování povodňové vlny byl zvolen 300 opakování. Startovací hladina vody v nádrži na začátku řešení transformace povodňové vlny byla vždy na plném zásobním objemu  $V_Z$ , tedy na nově spočtené výšce  $h_{V_Z}$  odpovídajícího kvantilu nebo horní meze  $V_Z$ . Na Obr. 65 až Obr. 76 jsou vykresleny výsledky ze softwaru TRANSFORM\_WAVE jednotlivých průběhů transformací pro vybrané optimální hodnoty  $V_Z$  z Tab. 12. V těchto obrázcích jsou opět červeně zobrazeny generované průběhy povodňových vln, modře výsledky transformovaných vln a zeleně průběhy výšek vody v nádrži během transformací.



**Obr. 65** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10 \%$  pro 75 % kvantil  $V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A

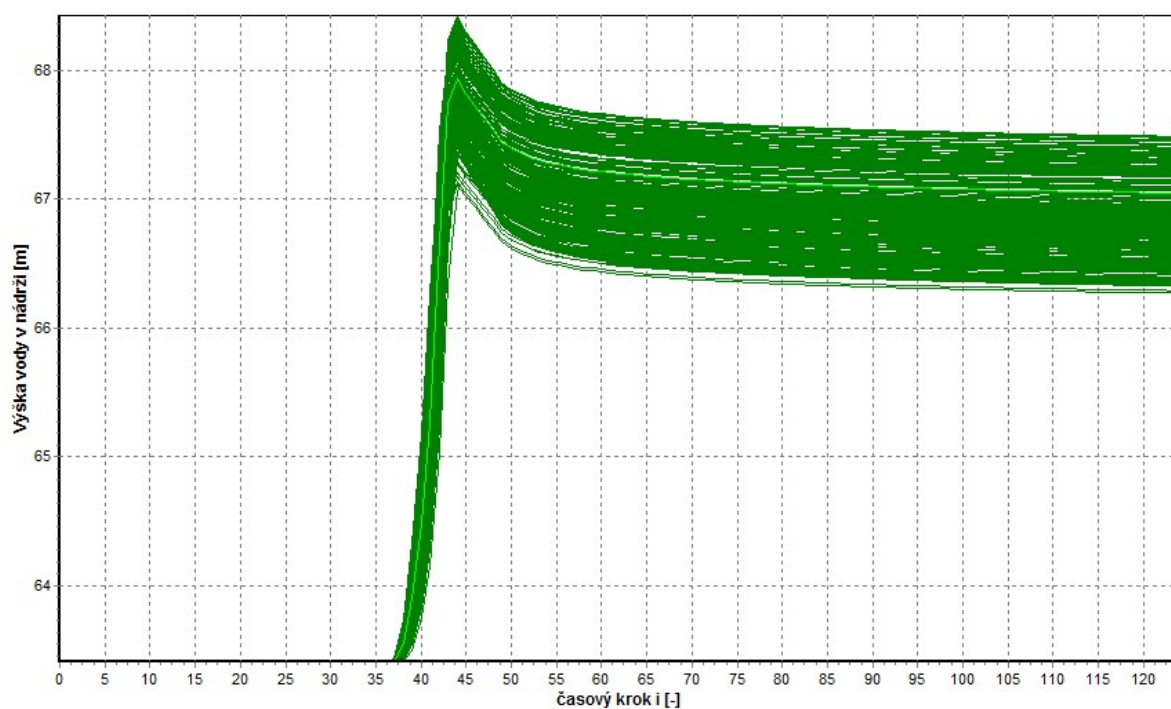


**Obr. 66** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10 \%$  pro 75 % kvantil  $V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A

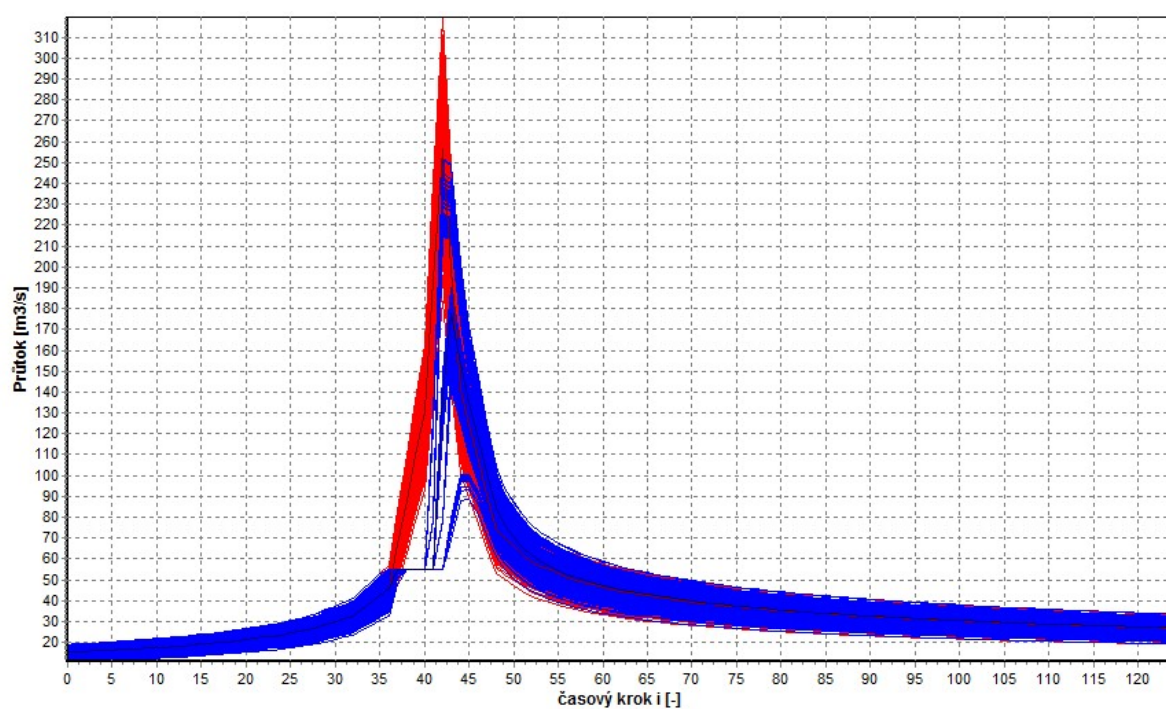


**Obr. 67** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10 \%$  pro 80 % kvantil  $V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A

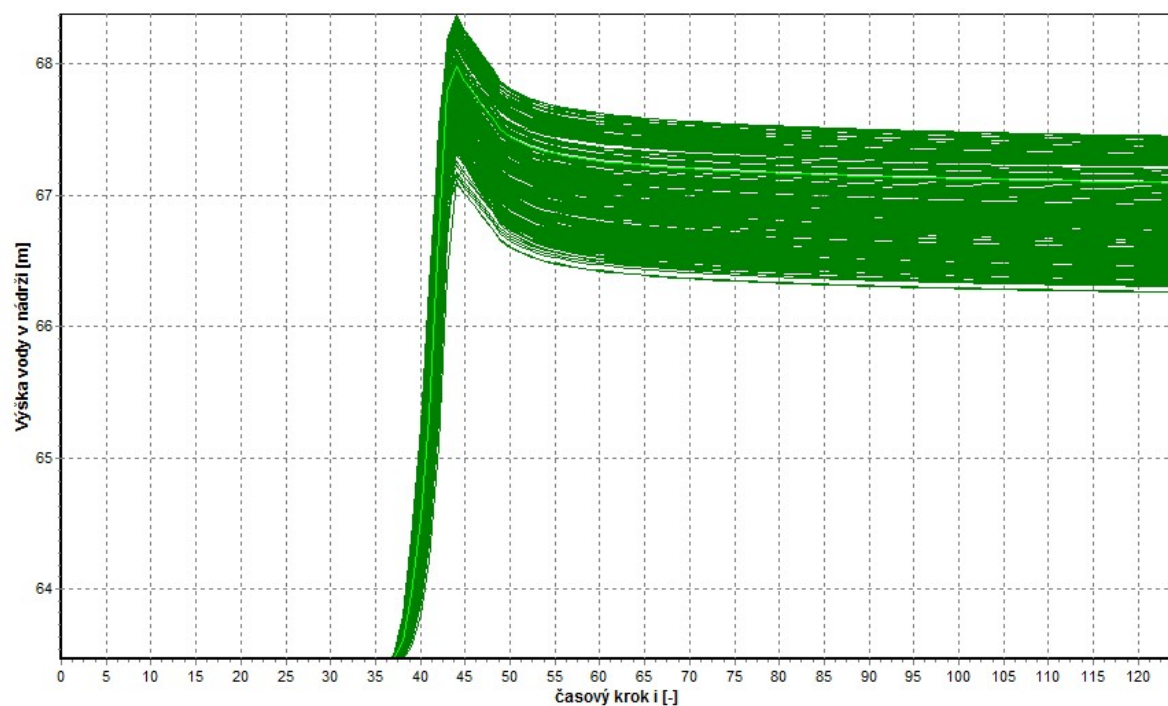




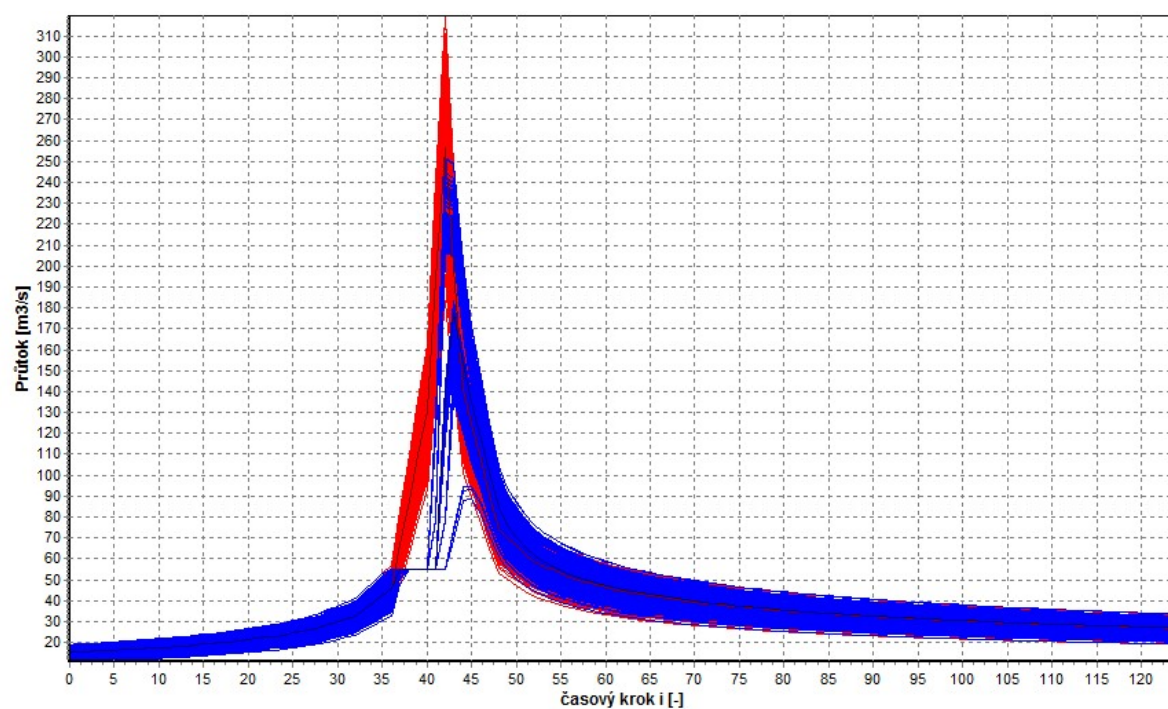
**Obr. 68** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10 \%$  pro 80 % kvantil  $V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A



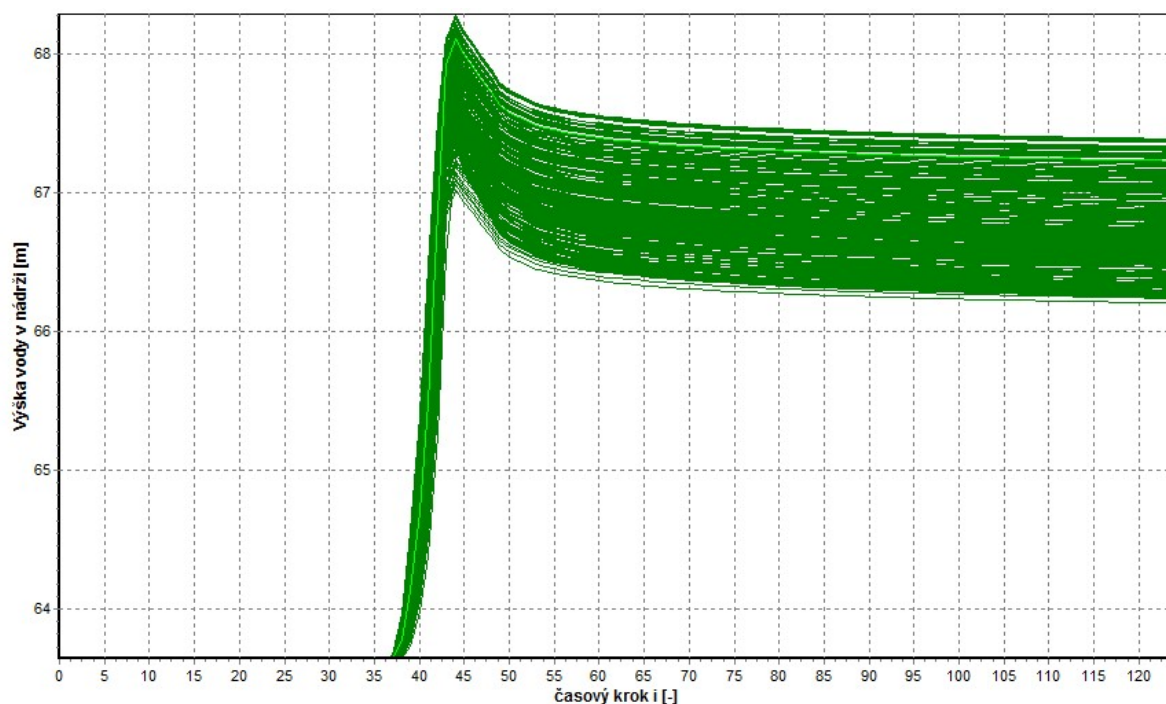
**Obr. 69** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10 \%$  pro 85 % kvantil  $V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A



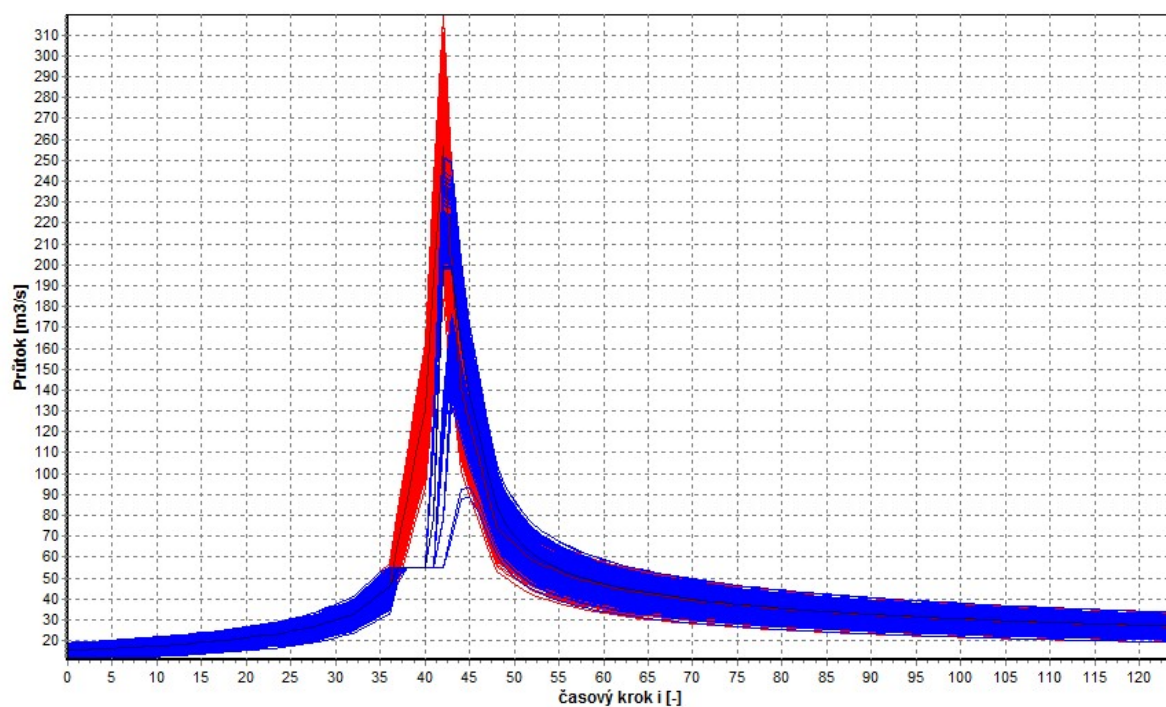
**Obr. 70** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10\%$  pro 85 % kvantil  $V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A



**Obr. 71** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10\%$  pro 90 % kvantil  $V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A

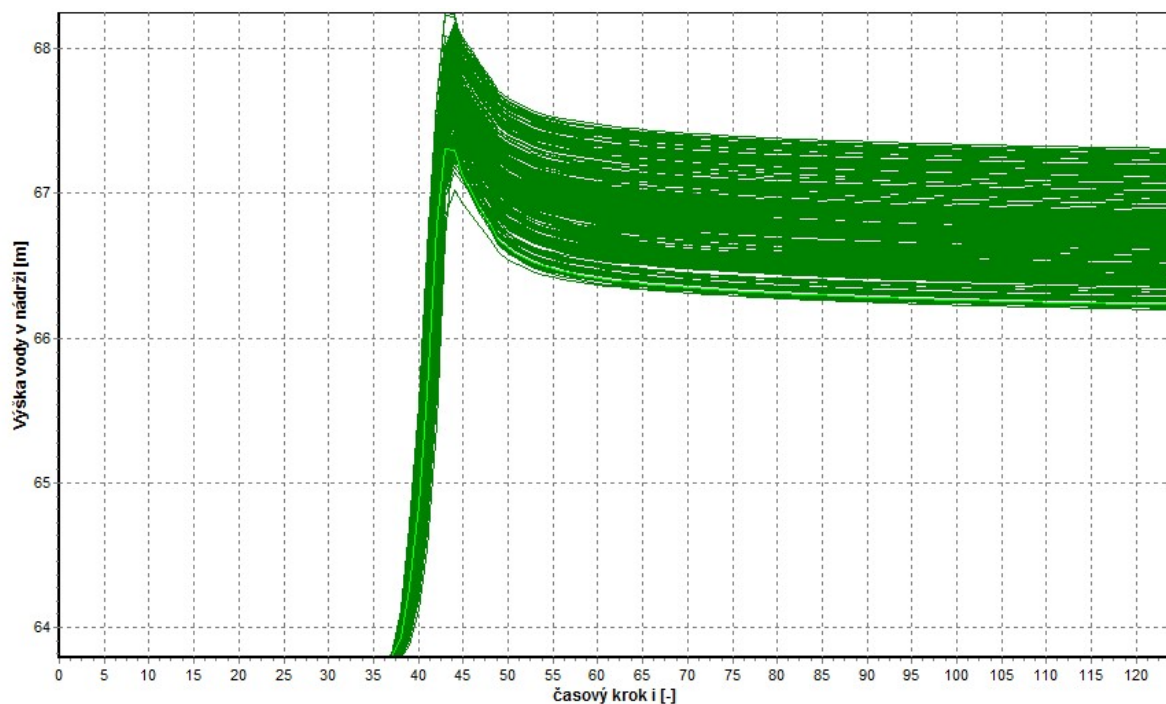


**Obr. 72** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10 \%$  pro 90 % kvantil  $V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A

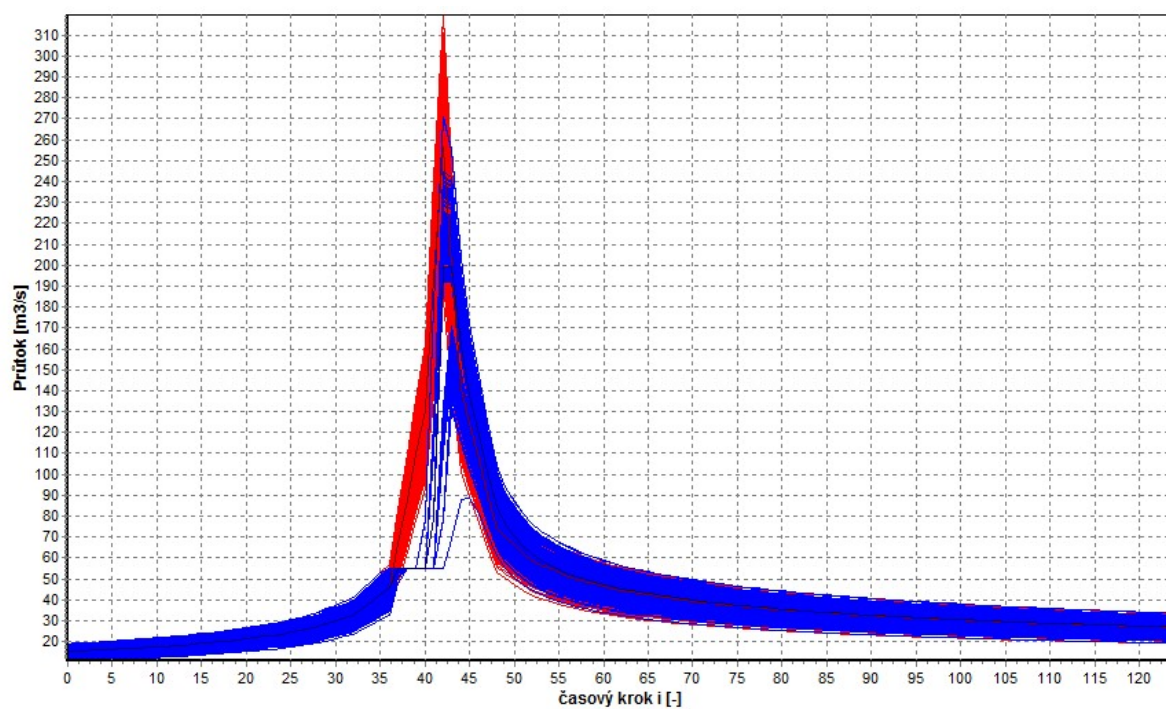


**Obr. 73** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10 \%$  pro 95 % kvantil  $V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A

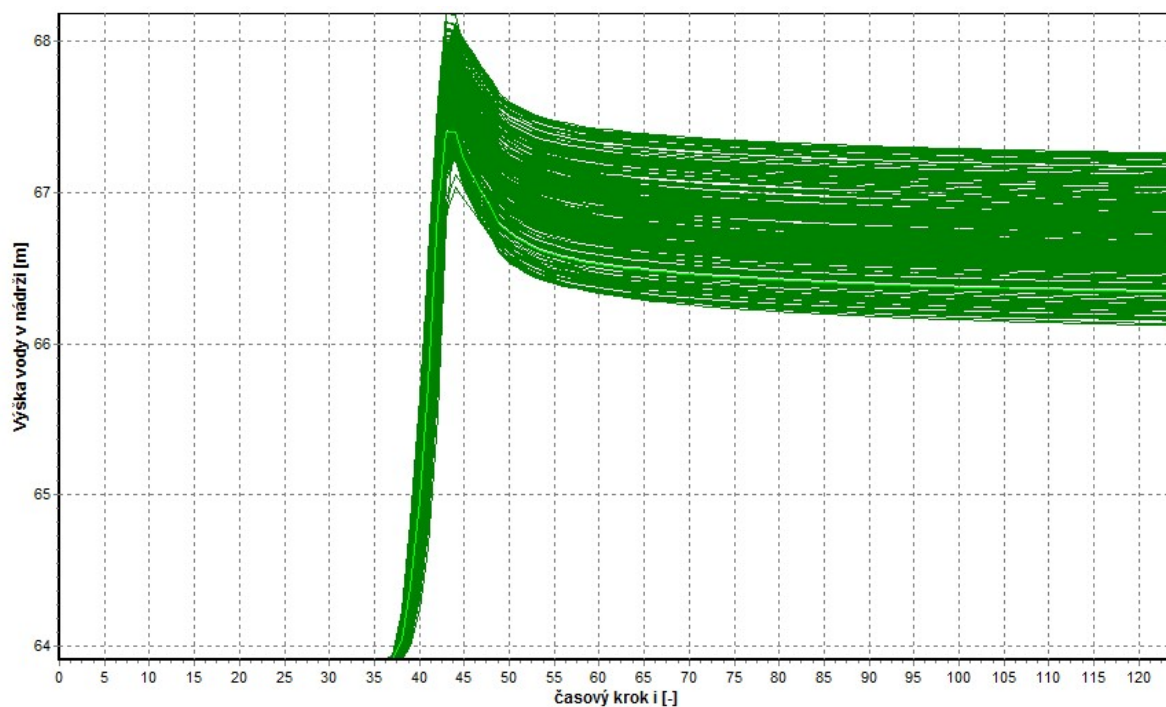




**Obr. 74** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10 \%$  pro 95 % kvantil  $V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A



**Obr. 75** Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10 \%$  pro horní mez  $+2\sigma V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A



**Obr. 76** Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln  $Q_{1.000}$  zatížených vstupní nejistotou  $u_B = \pm 10 \%$  pro horní mez  $+2\sigma V_{Zoptim}$  při variantě řízení nádrže A

Obr. 65 až Obr. 76 mají podobné průběhy transformací generovaných povodňových vln a takéž podobné průběhy dosažených výšek, jen s tím rozdílem, že startovací hladina je ze zvoleného optimálního zásobního objemu. Za povšimnutí stojí, že na Obr. 70 a Obr. 72 je deterministické řešení (odlišným odstínem) průběhu výšky vody v nádrži během transformace výše, než většina generovaných transformací a naopak na Obr. 74 a Obr. 76 je tento průběh níže. To je pravděpodobně způsobeno velikostí časového kroku, jak bylo popsáno ve výsledcích v kapitole 6.3 Retenční prostor nádrže. V porovnání výsledků se stejnou manipulací a povodňovou vlnou, tedy Obr. 56 a Obr. 57 pro stejnou vstupní velikost nejistoty povodňové vlny  $u_B = \pm 10 \%$  při startovací výšce 63 m ze stávajícího zásobního objemu je patrný mírný pokles kulminací výšek vody v nádrži. Tento pokles je potvrzen i v Tab. 13, konkrétně ve sloupci výška  $h_{RN}$  neboli výška retenčního prostoru neovladatelného, resp. dosažené kulminace výšky vody v nádrži během transformací povodňových vln.

**Tab. 13** Výsledné objemy vody v nádrži a jejich odpovídající výška vody v nádrži pro vybrané optimální hodnoty  $V_{Zoptim}$  [ $m^3$ ] včetně velikostí kulminací transformovaných povodňových vln  $Q_{1.000}$

	výška $h_{Vz}$	$V_{Zoptim}$	výška $h_{RO}$	$V_{RO}$	výška $h_{RN}$	$V_{RN}$	$V_R$	$V_{celk}$	$Q_{kulm}$ ( $PV_{Q_{1.000}}$ )	výška po KMH
	[m]	[ $m^3$ ]	[m]	[ $m^3$ ]	[m]	[ $m^3$ ]	[ $m^3$ ]	[ $m^3$ ]	[ $m^3s^{-1}$ ]	[m]
souč. stav	63.00	44 056 000	65.60	5 286 000	67.00	3 051 000	8 337 000	56 193 000	-	2.00
pro souč. stav	63.00	44 056 000	65.60	5 286 000	67.80 $\pm 0.64$	5 002 000 $+ 1 554 000$	10 288 000 <b>11 842 000</b>	58 144 000 <b>59 698 000</b>	172.11 $\pm 62.54$	1.20 <b>0.56</b>
75% kvantil $V_z$	63.32	44 682 300	65.60	4 659 700	67.80 $\pm 0.61$	4 999 000 $+ 1 499 000$	9 658 700 <b>11 157 700</b>	58 141 000 <b>59 640 000</b>	177.91 $\pm 61.36$	1.20 <b>0.58</b>
80% kvantil $V_z$	63.41	44 858 400	65.60	4 483 600	67.80 $\pm 0.60$	4 990 000 $+ 1 471 000$	9 473 600 <b>10 944 600</b>	58 132 000 <b>59 603 000</b>	179.68 $\pm 61.56$	1.20 <b>0.60</b>
85% kvantil $V_z$	63.47	44 984 800	65.60	4 357 200	67.78 $\pm 0.60$	4 950 000 $+ 1 458 000$	9 307 200 <b>10 765 200</b>	58 092 000 <b>59 550 000</b>	181.12 $\pm 61.54$	1.22 <b>0.62</b>
90% kvantil $V_z$	63.64	45 310 700	65.60	4 031 300	67.71 $\pm 0.55$	4 770 000 $+ 1 336 000$	8 801 300 <b>10 137 300</b>	57 912 000 <b>59 248 000</b>	185.86 $\pm 61.43$	1.29 <b>0.75</b>
95% kvantil $V_z$	63.79	45 628 200	65.60	3 713 800	67.70 $\pm 0.51$	4 755 000 $+ 1 239 000$	8 468 800 <b>9 707 800</b>	57 897 000 <b>59 136 000</b>	188.41 $\pm 60.41$	1.30 <b>0.79</b>
horní mez $V_z(+2\sigma)$	63.90	45 770 228	65.60	3 571 772	67.67 $\pm 0.49$	4 676 000 $+ 1 181 000$	8 247 772 <b>9 428 772</b>	57 818 000 <b>58 999 000</b>	190.87 $\pm 59.59$	1.33 <b>0.85</b>

V Tab. 13 vidíme výšku hladiny  $h_{Vz}$  a optimální zásobní objem  $V_{Zoptim}$ . Dále výšku  $h_{RO}$  a objem  $V_{RO}$  retenčního prostoru ovladatelného, výšku  $h_{RN}$  včetně rozšířené nejistoty  $\pm 2\sigma$  a objem  $V_{RN}$  včetně horní meze rozšířené nejistoty  $+ 2\sigma$  retenčního prostoru neovladatelného. Dále celkový objem retenčního prostoru  $V_R$  včetně horní meze rozšířené nejistoty  $+ 2\sigma$  (tučně) a stejně tak celkový objem nádrže  $V_{celk}$ . Nakonec jsou v posledních sloupcích zobrazeny hodnoty kulminací povodní  $Q_{1.000}$  včetně rozšířené nejistoty  $\pm 2\sigma$  (tučně) a výška mezi retenčním prostorem neovladatelným (maximální výška vody v nádrži) a kontrolní maximální hladinou KMH (výška hráze) včetně horní meze rozšířené nejistoty  $+ 2\sigma$  (tučně). Můžeme vidět výsledky z transformací generovaných povodňových vln pro vybrané optimální hodnoty  $V_{Zoptim}$ .

Nejprve v prvním řádku této tabulky je současný stav nádrže dle (Manipulační řád VD Vír, 2011) a ve druhém řádku pak výsledky transformace povodňové vlny  $Q_{1.000}$  pro současný stav  $V_z$ , která byla provedena již v kapitole 6.3 Retenční prostor nádrže. Další řádky jsou pro vybrané optimální hodnoty  $V_{Zoptim}$ .

Výsledky ukazují, že s vyšším zásobním objemem při neměnění se výšce bezpečnostního přelivu (hladina  $h_{RO}$ ) klesá retenční prostor ovladatelný  $V_{RO}$  a zároveň klesá i výška retenčního prostoru neovladatelného  $h_{RN}$  včetně rozšířené nejistoty spolu s retenčním objemem nádrže  $V_{RN}$  včetně horní meze rozšířené nejistoty. S tím roste i velikost mezi  $h_{RN}$  a KMH, což je žádanější. Na druhou stranu i přes to, že hodnoty objemů a výšek klesají, tak jsou výrazněji vyšší (u rozdílu mezi  $h_{RN}$  a KMH menší) než jsou skutečné hodnoty stávající nádrže Vír I.

Výše popsané je způsobeno tím, že pro danou vyšší hodnotu  $V_Z$  (startovací hladinu) odpovídá větší objem z čáry zatopených objemů, a tudíž je v počátečním kroku povodně a následujících krocích zachyceno více vody, než při startovací výšce 63 m. V důsledku toho je tedy výsledný retenční objem pro transformaci povodně a výsledný celkový objem funkčních prostorů nádrže Vír I menší, než při transformaci uvažované povodňové vlny včetně nejistot ze skutečného zásobního objemu nádrže. Tím se nabízí návrh pro nejbezpečnější řešení, co se týče optimálního  $V_{Zoptim}$ , tedy buď 95 % kvantil  $V_{Zoptim}$  nebo horní mez  $V_{Zoptim}(+2\sigma)$ . Nesmíme ale zapomenout, že při této volbě roste kulminační průtok transformované povodňové vlny. Např. pro transformaci ze současného stavu je kulminační průtok horní meze rozšířené nejistoty  $(+2\sigma)$   $234,65 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a pro transformaci z 95 % kvantilu  $V_{Zoptim}$  je kulminační průtok  $248,82 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , což může být při budoucím návrhu funkčních prostorů nádrže jeden z klíčových parametrů. Dalším klíčovým parametrem při změně funkčních objemů nádrže může být velikost mezi  $h_{RN}$  a  $KMH$ .

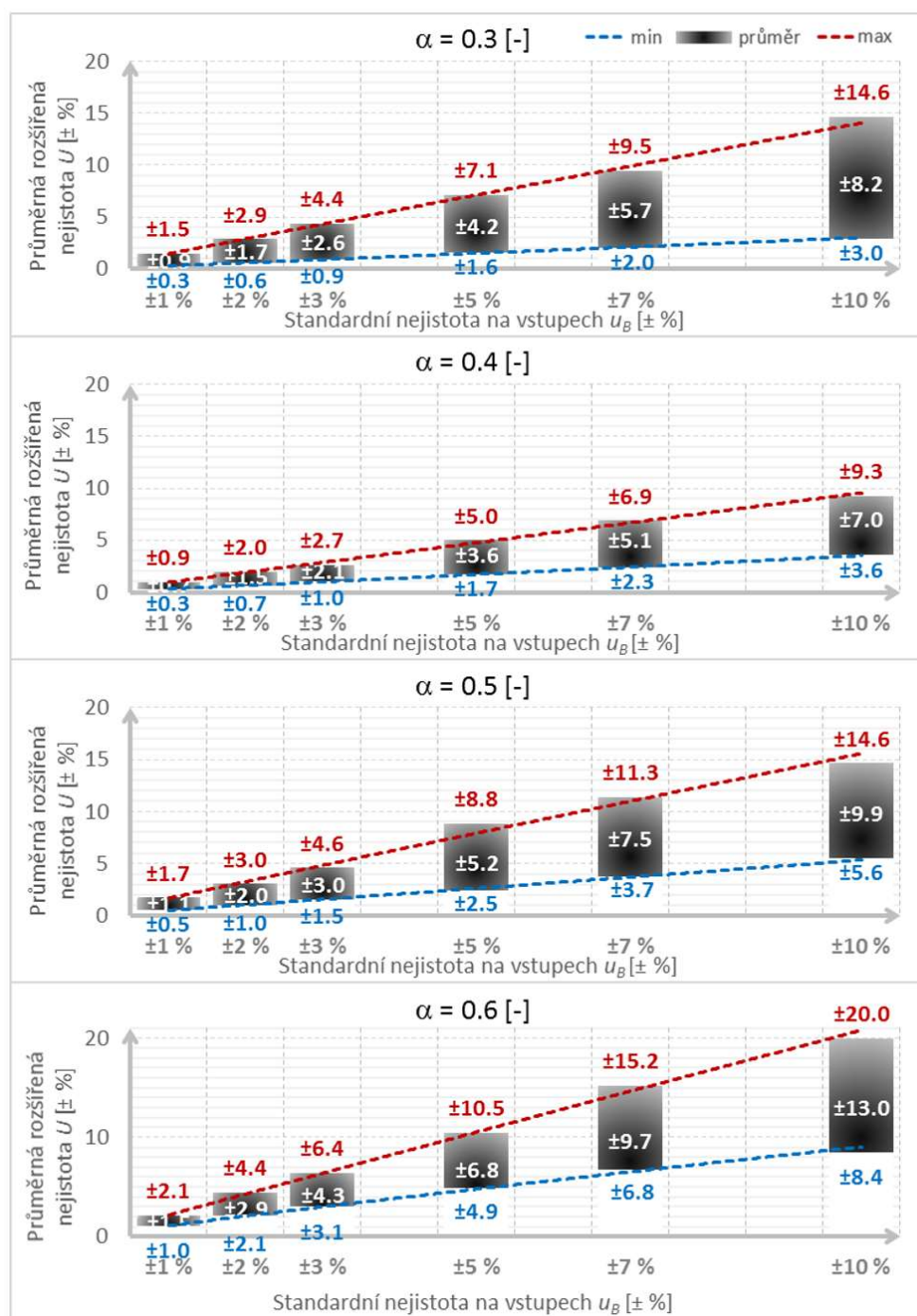
Ve shrnutí výsledků je Tab. 13 ještě podrobněji rozšířena. Konkrétně jsou shrnuty výsledky objemů vody v nádrži pro vybrané optimální hodnoty  $V_{Zoptim}$  s tím rozdílem, že retenční prostor nádrže v podmínkách nejistot (transformace generovaných povodňových vln) je vyhodnocen ještě také pomocí kvantilů, jako tomu bylo u zásobního objemu nádrže v podmínkách nejistot.



## 7 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ

### 7.1 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení 100 %

Na Obr. 77 jsou pro shrnutí výpočtů vykresleny zprůměrované hodnoty výsledných rozšířených nejistot zásobních objemů  $U_{Vz}$  všech profilů pro vstupní nejistoty  $u_B$  a pro součinitele nalepšení  $\alpha$  s vyznačeným minimálním a maximálním výskytem nejistoty  $U_{Vz}$ .



**Obr. 77** Výsledky průměrných rozšířených nejistot zásobního objemu  $U_{Vz}$  [± %] všech profilů pro uvažované vstupní nejistoty  $u_B$  [± %] a vybrané součinitele nalepšení  $\alpha$  [%]

Výsledné zprůměrované hodnoty rozšířených nejistot zásobních objemů  $U_{Vz}$  všech profilů jsou v rozmezí od 0,70 násobku standardní vstupní nejistoty  $u_B$  (varianta  $u_B = \pm 10 \%$  pro  $\alpha = 0,4$ ) do 1,50 násobku standardní vstupní nejistoty  $u_B$  (varianta  $u_B = \pm 1 \%$  pro  $\alpha = 0,6$ ) pro koeficient rozšíření  $k = 2$ . Vyjádření pomocí násobku standardní vstupní nejistoty  $u_B$  k výsledným rozšířeným nejistotám zásobních objemů  $U_{Vz}$  všech profilů je uvedeno v Tab. 14. Maximální hodnota výsledné rozšířené nejistoty  $U_{Vz}$  vyjádřena násobkem standardní vstupní nejistoty  $u_B$  nastala ve variantě pro  $\alpha = 0,6$  a  $u_B = \pm 2 \%$ . Tato  $U_{Vz}$  dosahovala  $\pm 4,4 \%$ , neboli 2,2 násobku  $u_B$  a minimální hodnota rozšířené nejistoty nastala ve více variantách, kdy byl dosažen pouze 0,3 násobek  $u_B$ .

**Tab. 14** Výsledný násobek standardní vstupní nejistoty  $u_B$  k výsledným rozšířeným nejistotám zásobních objemů  $U_{Vz}$  všech profilů

$\alpha [-]$	$u_B = \pm 1 \%$	$u_B = \pm 2 \%$	$u_B = \pm 3 \%$	$u_B = \pm 5 \%$	$u_B = \pm 7 \%$	$u_B = \pm 10 \%$
0.3	<b>0.89</b>	0.86	0.88	0.84	0.82	0.82
0.4	<b>0.74</b>	0.74	0.71	0.72	0.72	0.70
0.5	<b>1.09</b>	0.99	1.01	1.03	1.07	0.99
0.6	<b>1.50</b>	1.45	1.42	1.35	1.38	1.30

V Tab. 14 můžeme vidět, že s rostoucí vstupní nejistotou  $u_B$  má tendenci výsledný násobek klesat, jinými slovy poměr mezi vstupní nejistotou  $u_B$  a výslednou rozšířenou nejistotou zásobních objemů  $U_{Vz}$  je menší. Dále je zřejmý nárůst násobku s rostoucím koeficientem  $\alpha$ .

Při návrhu zásobního objemu je žádoucí uvažovat se vstupními nejistotami. Výsledek zásobního objemu pak o tyto nejistoty navýšit. Na základě popsané analýzy je doporučeno uvažovat alespoň s výslednou průměrnou hodnotou rozšířené nejistoty  $U_{Vz}$ , v lepším případě s maximální hodnotou této nejistoty. Návrh by ale mohl být v některých případech zbytečně předimenzovaný a nákladnější. Z Obr. 77 a Tab. 14 plynou doporučené hodnoty všech průměrných výsledných rozšířených nejistot  $U$ . Konkrétně jsou doporučeny hodnoty průměrovaných  $U_{Vz}$  pro maximální násobky (vyznačeny tučně), které byly dosaženy při  $u_B = \pm 1 \%$ , tedy pro  $\alpha = 0,3$  alespoň 0,89 násobek vstupní nejistoty  $u_B$ , pro  $\alpha = 0,4$  alespoň 0,74 x  $u_B$ , pro  $\alpha = 0,5$  alespoň 1,09 x  $u_B$  a pro  $\alpha = 0,6$  alespoň 1,5 x  $u_B$ .

Obecné doporučení je tedy takové, že budeme-li například uvažovat při návrhu zásobního objemu nádrže, že vstupní nejistoty  $u_B$  dosahují hodnot cca 4 % a návrh bude proveden na  $\alpha = 0,5$ . Potom k výslednému deterministickému zásobnímu objemu, který bude třeba 10 mil. m<sup>3</sup>, na stranu bezpečnou přičteme objem 0,44 mil. m<sup>3</sup>, respektive ho navýšíme o 4,4 % (pro  $\alpha = 0,5$  odpovídá doporučený násobek 1,1 a vstupní nejistota byla odhadnuta na 4 %). Spolehlivější a bezpečnější návrh, který uvažuje se vstupní nejistotou, je pak 10,44 mil. m<sup>3</sup>. Tento návrh vychází z Tab. 15, která byla odvozena na základě provedené

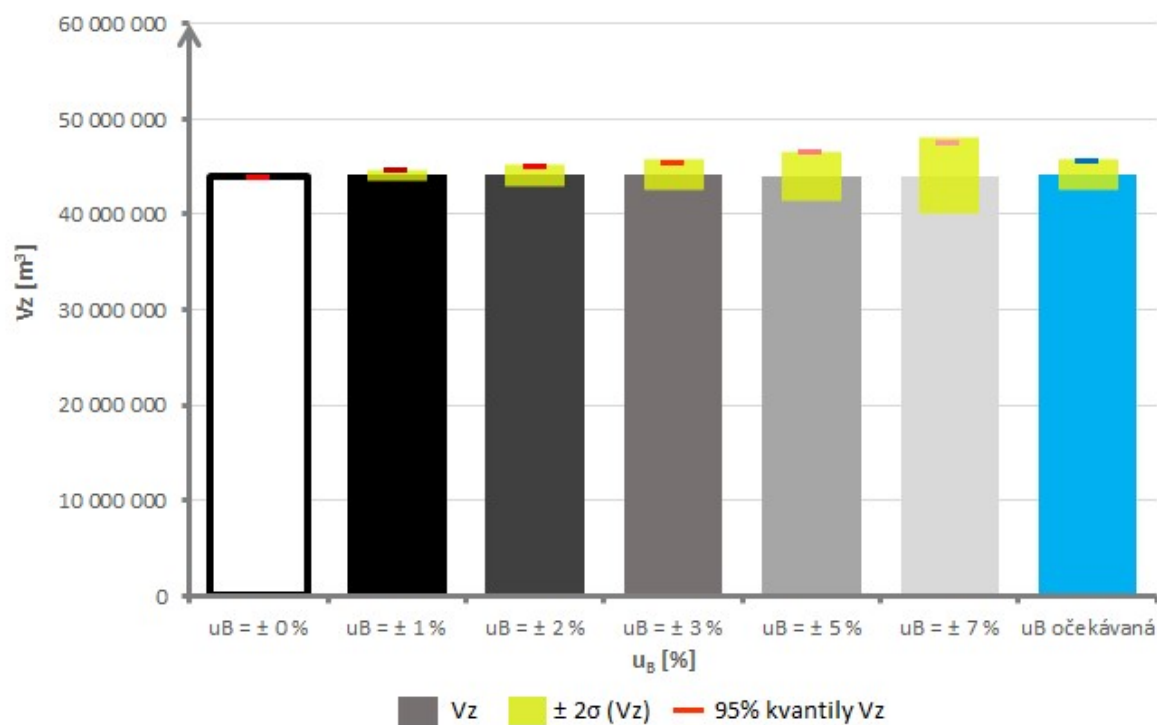
analýzy na více profilech a dané navýšení zásobního objemu nádrže odpovídá přibližně pravděpodobnosti pokrytí 95 %.

Nutno ale podotknout, že tyto doporučené hodnoty pro návrh zásobního objemu vychází z analýzy provedené na 6 profilech vodních děl a pro zjednodušení byly velikosti vstupních nejistot  $u_B$  pro všechny vstupy konstantní. Z tohoto důvodu by bylo vhodné u konkrétního nového návrhu zásobních prostorů uvažovat s co nejpravděpodobnějšími velikostmi nejistot  $u_B$  u jednotlivých vstupů a pomocí vyvinutého softwaru provést konkrétní výpočty a analýzy.

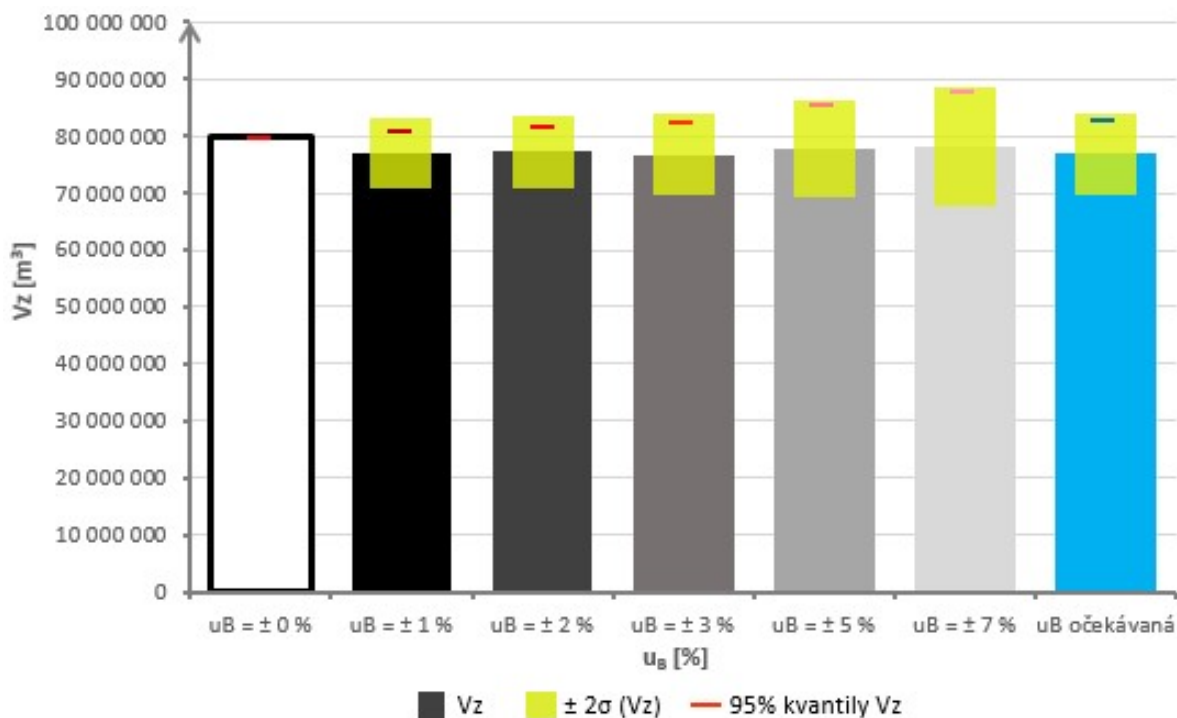
## 7.2 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení menší než 100 %

Ve výpočtech v kapitole 6.2 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečení menší než 100 % byl pro vodní nádrže Vír I a Vranov nejprve snížen požadovaný odtok nádrže z důvodu aktualizované řady přítoků vody do nádrže a následně bylo doporučeno konkrétní navýšení stávajícího zásobního objemu nádrže, který by se vypořádal se vstupními nejistotami při vodohospodářském řešení zásobního objemu nádrže.

Na Obr. 78 a Obr. 79 jsou pro shrnutí provedených analýz vykresleny výsledné optimalizované zásobní objemy formou sloupcového grafu pro všechny testované vstupní nejistoty nádrže Vír I a nádrže Vranov. Dále jsou žlutou barvou vyznačeny dolní a horní meze pro  $\pm 2$  směrodatné odchylky zásobních objemů a červeně pak řešení pomocí 95 % kvantilů. V posledním modrém sloupci jsou výsledky  $V_Z$  s pravděpodobně očekávanými vstupními nejistotami. Dosažené výsledky v tomto sloupci jsou velmi vhodné pro relativně bezpečný návrh zásobního objemu nádrže.



**Obr. 78** Sloupcový graf výsledných optimalizovaných zásobních objemů  $\mu(V_{Zoptim})$  nádrže Vir I pro  $\pm 2\sigma(V_z)$  a 95 % kvantilů testovaných vstupních nejistot  $u_B$



**Obr. 79** Sloupcový graf výsledných optimalizovaných zásobních objemů  $\mu(V_{Zoptim})$  nádrže Vranov pro  $\pm 2\sigma(V_z)$  a 95 % kvantilů testovaných vstupních nejistot  $u_B$

Z Obr. 78 a Obr. 79 plyne, že s rostoucí vstupní nejistotou  $u_B$  roste rozptyl výsledných hodnot. Jak již bylo řečeno, tak je z výsledků patrné, že na Obr. 78 pro nádrž Vír I dosahují sloupce výsledných  $V_Z$  velmi blízkých výsledků stávajícího zásobního objemu nádrže. Naopak na Obr. 79 pro nádrž Vranov vidíme, že sloupce s výslednými  $V_Z$  jsou relativně rozkolísané a odlišné od stávajícího zásobního objemu nádrže.

V Tab. 15 jsou procentuálně vyjádřeny nárůsty hodnot rozptylů výsledných optimalizovaných zásobních objemů  $\pm 2\sigma(V_{Zoptim})$  ke stávajícímu  $V_Z$  nádrží Vír I a Vranov v závislosti na vstupních nejistotách  $u_B$ .

**Tab. 15** Procentuální nárůsty rozptylů  $\pm 2\sigma(V_{Zoptim})$  nádrže Vír I a Vranov v závislosti na vstupních nejistotách  $u_B$

[%]	$u_B = \pm 1 \%$	$u_B = \pm 2 \%$	$u_B = \pm 3 \%$	$u_B = \pm 5 \%$	$u_B = \pm 7 \%$	$u_B$ očekávaná
Vír I	1.24	2.58	3.69	5.84	8.99	3.68
Vranov	7.77	8.09	8.80	10.64	13.16	8.87

Výsledky z Tab. 15 ukazují, že každá nádrž reaguje úplně jinak na vstupní nejistotu. Mezi jednotlivými nádržemi je ihned patrný rozdíl ve velikostech výsledných hodnot. Dále pak u nádrže Vír I mají výsledky v podobě  $\pm 2\sigma(V_{Zoptim})$  plynulý nárůst v závislosti na  $u_B$ . Naopak u nádrže Vranov při nižších vstupních nejistotách je výsledná směrodatná odchylka velmi podobná a plynulý nárůst je zaznamenán až od vstupní nejistoty  $u_B = \pm 3 \%$ . Tyto závěry opět potvrzují, že se každá nádrž v podmínkách nejistot chová odlišně vzhledem k výsledkům, a tudíž konkrétní dosažené výsledky nelze zobecňovat.

### 7.3 Retenční prostor nádrže

Ve výpočtech v kapitole 6.3 Retenčního prostoru nádrže bylo pro vodní nádrže Vír I doporučeno konkrétní navýšení stávajícího retenčního objemu nádrže, který by se vypořádal s aktualizovanou povodňovou vlnou  $Q_{1.000}$  bez předpouštění včetně vstupní nejistoty vznikající při odvození povodňové vlny. Na této nádrži by hladina ochranného prostoru teoreticky navýšit šla aktualizací manipulačního řádu nádrže, ale na úkor nedodržení doporučené hodnoty mezi hladinou retenčního prostoru neovladatelného a kontrolní maximální hladinou, která je u takovýchto typů nádrží většinou doporučena 2 m z důvodu přelítí hráze například díky výběhu větrové vlny apod. Při navrhovaném navýšení retenčního objemu směrem k hrázi by poté tato hodnota byla pouze 0,56 m. Ovšem na jiných typech hrází, jako jsou třeba sypané, by mohl vznikat ještě větší problém s navyšováním hladiny ke koruně hráze. Proto by tento problém měl být zároveň řešen i variantou zkapacitnění spodních výpustí a bezpečnostního přelivu, případně zásahem do zásobního objemu nádrže,

což je hlavně v dnešní době, kdy zaznamenáváme poklesy hladin v nádržích, nejméně vhodné.

Výsledky dále ukazují, že testovaná vodní nádrž Vír I se dokáže relativně dobře vypořádat s možnými aktualizovanými povodňovými vlnami. KMH neboli v tomto případě výška hráze je pro deterministické řešení dobře navržena a při vhodných manipulacích se vodní nádrž vypořádá i s nejextrémnějšími povodněmi včetně vstupních nejistot na povodňových vlnách. Retenční prostor nádrže se dobře dokáže vyrovnat s aktualizovanými povodňovými vlnami  $Q_{100}$  a  $Q_{1.000}$  ve variantě B s předpouštěním. Ovšem ve variantě A bez předpouštění stávající celkový retenční objem nádrže vyhoví pouze pro deterministické řešení povodňové vlny  $Q_{100}$ . Při snaze držet nádrž co nejvíce naplněnou bez předpouštění je i při nižších povodních se zavedením menších vstupních nejistot stávající retenční objem nevyhovující a bylo by vhodné tento retenční prostor navýšit.

Nakonec byl vyhodnocen transformační efekt nádrže Vír I testovaných povodňových vln včetně vstupních nejistot podle rovnice (24), viz Tab. 16. Při vyhodnocení se vstupní nejistotou byla brána horší varianta maximálního transformovaného odtoku, tedy přičtení rozšířené nejistoty k výsledné kulminaci. Čím je výsledná hodnota transformačního efektu vyšší, tím je nádrž efektivnější pro transformaci povodňových vln.

**Tab. 16** Transformační efekt nádrže Vír I [%] testovaných povodňových vln

$Q_N$	VARIANTA A bez předpouštění				VARIANTA B s předpouštěním			
	determinist.	$u_B = \pm 5 \%$	$u_B = \pm 10 \%$	$u_B = \pm 15 \%$	determinist.	$u_B = \pm 5 \%$	$u_B = \pm 10 \%$	$u_B = \pm 15 \%$
$Q_{100}$	60.68	47.32	42.88	38.11	66.87	66.87	66.87	66.87
$Q_{1.000}$	30.79	22.35	8.59	<b>(-2.32)</b>	78.57	78.57	73.91	68.96
$Q_{10.000}$	20.35	3.99	<b>(-4.98)</b>	<b>(-13.48)</b>	57.99	45.59	32.74	18.62

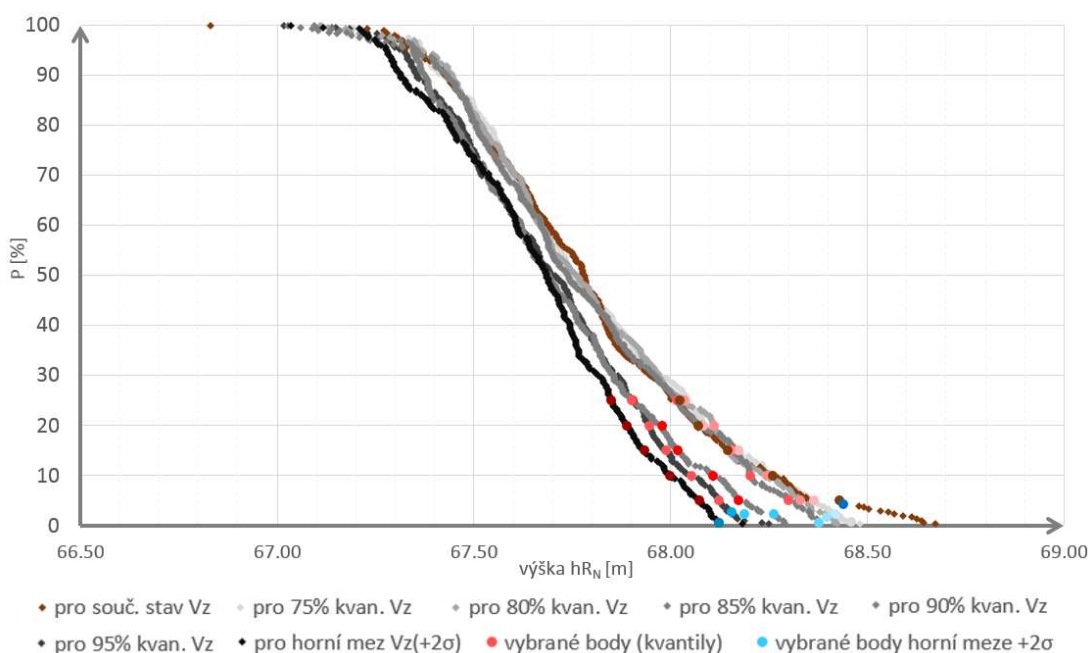
Z Tab. 16 je zřejmé, že největší efekt při transformaci povodňových vln zatížených vstupními nejistotami je ve variantě B pro povodňovou vlnu  $Q_{1.000}$ . Dále čím je větší vstupní nejistota povodňové vlny, tím je účinnost transformace nižší, což je způsobeno formou vyhodnocení (uvažována horší varianta transformace na stranu bezpečnou). V ojedinělých případech toto vyhodnocení způsobilo dokonce záporný účinek transformace, což ve skutečnosti nikdy nenastane. Nejnižší transformační účinky jsou ve variantě A pro povodňovou vlnu  $Q_{10.000}$ . Celkově je dosaženo lepších transformací ve variantě B, ale jak bylo řečeno ve výsledcích v kapitole 6.3 Retenčního prostoru nádrže, tak pro povodeň  $Q_{10.000}$  a variantu B vzniká větší riziko přelítí nádrže. Z toho plyne, že v tomto případě nelze obecně doporučit předpouštění nádrže pro lepší transformační účinek. Jednak může při nízké povodňové vlně dojít ke zbytečnému upuštění nádrže, ale naopak při extrémní povodňové



vlně může být riziko přelití nádrže vyšší než bez předpouštění. Předpouštění nádrže ale lze doporučit v případech spolehlivých operativních předpovědí povodňových situací.

#### 7.4 Komplexní řešení funkčních prostorů nádrže

Na Obr. 80 jsou zobrazeny výsledky kulminací výšek vody v nádrži během transformací generovaných povodňových vln  $Q_{10,000}$  zatíženými vstupními nejistotami  $u_B = \pm 10\%$  formou pravděpodobnosti překročení pro vybrané optimální zásobní objemy i pro současný zásobní objem nádrže Vír I.



**Obr. 80** Pravděpodobnosti překročení výsledných kulminací výšek vody v nádrži Vír I během transformace nejisté povodňové vlny  $Q_{10,000}$  pro vybrané zásobní objemy

Na Obr. 80 můžeme vidět, jak již bylo popsáno ve výsledcích v kapitole 6.4 Komplexní řešení funkčních prostorů nádrže, že při vyšší startovací výšce (vyšší % kvantil  $V_Z$ ) jsou dosaženy nižší kulminace vody v nádrži, respektive hladina  $h_{RN}$  neboli maximální hladina vody v nádrži nevystoupá tak vysoko. Zároveň jsou na vykreslených průbězích vyznačeny vybrané kvantily a horní meze  $+2\sigma$ , obdobně jako bylo v analýze u  $V_Z$ . Kompletní výsledky kulminací výšek vody v nádrži s možnými funkčními prostory jsou detailně shrnuty v Tab. 17, ve které jsou škálou barev zvýrazněny dosažené výsledky. Červená barva odpovídá nejméně vhodnému výsledku až po zelenou barvu, která odpovídá vyhovujícímu výsledku. Z Tab. 17 tedy plyne, že nejvhodnější volba řešení je ve spodní části tabulky. Tedy ve výrazném navýšení  $V_Z$  na úkor velikosti kulminace povodně, protože u těchto řešení je dosaženo vyšších kulminací výšek vody v nádrži během transformace, ale zároveň je větší výška mezi  $h_{RN}$  a KMH. U velkých povodní, což  $Q_{1,000}$  bezpochyby je, se musí brát především ohled na bezpečnost samotné hráze, tedy eliminovat přelití KMH.

**Tab. 17** Výsledné objemy vody v nádrži a jejich odpovídající výška vody v nádrži pro vybrané optimální hodnoty  $V_{Zoptim}$  [m<sup>3</sup>] včetně velikostí kulminací transformovaných povodňových vln

	h. mez $Q_{kulm}$ (+2 $\sigma$ ) ( $Q_{1.000}$ )	výška $h_{Vz}$	$V_{Zoptim}$	výška $h_{RO}$	$V_{RO}$		výška $h_{RN}$	$V_{RN}$	$V_R$	$V_{celk}$	výška po KMH
	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[m]	[m <sup>3</sup> ]		[m]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m]
pro souč. stav	234.65	63.00	44 056 000	65.60	5 286 000	75% kv.	68.02	5 533 000	10 819 000	58 675 000	0.98
						80% kv.	68.07	5 655 000	10 941 000	58 797 000	0.93
						85% kv.	68.15	5 857 000	11 143 000	58 999 000	0.85
						90% kv.	68.26	6 118 000	11 404 000	59 260 000	0.74
						95% kv.	68.43	6 532 000	11 818 000	59 674 000	0.57
						mez(+2 $\sigma$ )	68.44	6 556 000	11 842 000	59 698 000	0.56
75% kvan. Vz	239.27	63.32	44 682 300	65.60	4 659 700	75% kv.	68.04	5 582 000	4 659 768	58 724 000	0.96
						80% kv.	68.08	5 679 000	4 659 768	58 821 000	0.92
						85% kv.	68.17	5 898 000	4 659 768	59 040 000	0.83
						90% kv.	68.26	6 118 000	4 659 768	59 260 000	0.74
						95% kv.	68.36	6 362 000	4 659 768	59 504 000	0.64
						mez(+2 $\sigma$ )	68.42	6 498 000	11 157 700	59 640 000	0.58
80% kvan. Vz	241.24	63.41	44 858 400	65.60	4 483 600	75% kv.	68.03	5 557 000	10 040 600	58 699 000	0.97
						80% kv.	68.11	5 752 000	10 235 600	58 894 000	0.89
						85% kv.	68.15	5 857 000	10 340 600	58 999 000	0.85
						90% kv.	68.24	6 069 000	10 552 600	59 211 000	0.76
						95% kv.	68.33	6 288 000	10 771 600	59 430 000	0.67
						mez(+2 $\sigma$ )	68.40	6 461 000	10 944 600	59 603 000	0.60
85% kvan. Vz	242.66	63.47	44 984 800	65.60	4 357 200	75% kv.	68.02	5 533 000	9 890 200	58 675 000	0.98
						80% kv.	68.08	5 679 000	10 036 200	58 821 000	0.92
						85% kv.	68.16	5 874 000	10 231 200	59 016 000	0.84
						90% kv.	68.20	5 972 000	10 329 200	59 114 000	0.80
						95% kv.	68.30	6 215 000	10 572 200	59 357 000	0.70
						mez(+2 $\sigma$ )	68.38	6 408 000	10 765 200	59 550 000	0.62
90% kvan. Vz	246.29	63.64	45 310 700	65.60	4 031 300	75% kv.	67.90	5 241 000	9 272 300	58 383 000	1.10
						80% kv.	67.98	5 436 000	9 467 300	58 578 000	1.02
						85% kv.	68.02	5 533 000	9 564 300	58 675 000	0.98
						90% kv.	68.11	5 752 000	9 783 300	58 894 000	0.89
						95% kv.	68.17	5 898 000	9 929 300	59 040 000	0.83
						mez(+2 $\sigma$ )	68.25	6 106 000	10 137 300	59 248 000	0.75
95% kvan. Vz	248.82	63.79	45 628 200	65.60	3 713 800	75% kv.	67.90	5 241 000	8 954 800	58 383 000	1.10
						80% kv.	67.95	5 362 000	9 075 800	58 504 000	1.05
						85% kv.	67.99	5 460 000	9 173 800	58 602 000	1.01
						90% kv.	68.05	5 606 000	9 319 800	58 748 000	0.95
						95% kv.	68.12	5 777 000	9 490 800	58 919 000	0.88
						mez(+2 $\sigma$ )	68.21	5 994 000	9 707 800	59 136 000	0.79
h. mez Vz(+2 $\sigma$ )	250.46	63.90	45 770 228	65.60	3 571 772	75% kv.	67.85	5 118 000	8 689 772	58 260 000	1.15
						80% kv.	67.89	5 216 000	8 787 772	58 358 000	1.11
						85% kv.	67.93	5 313 000	8 884 772	58 455 000	1.07
						90% kv.	68.00	5 484 000	9 055 772	58 626 000	1.00
						95% kv.	68.07	5 655 000	9 226 772	58 797 000	0.93
						mez(+2 $\sigma$ )	68.15	5 857 000	9 428 772	58 999 000	0.85

## 8 ZÁVĚR

V disertační práci byly popsány možné vstupující nejistoty plynoucí z měření, které vstupují do vodohospodářského řešení nádrže. Ve výpočtech pak tyto nejistoty byly uplatněny a byla vždy provedena detailnější analýza těchto nejistot včetně očekávané varianty neboli pravděpodobné velikosti nejistoty jednotlivých vstupů. Obdržené výsledky při řešení v podmínkách nejistot byly výrazně ovlivněny. Na stranu bezpečnou je vhodné výsledky až už zásobního nebo retenčního objemu o výsledné nejistoty navýšit.

Nejprve byla provedena podrobná analýza vstupních nejistot  $u_B$  pro vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže na 6 různých profilech vodních nádrží pomocí softwaru UNCE\_RESERVOIR. Procentuálním analyzováním rozšířených nejistot  $U$  zásobních objemů nebyla zjištěna závislost mezi jednotlivými profilemi (např. že by menší nebo méně vodné profile dosahovaly menších rozšířených nejistot). Tento fakt nám umožnil výsledky z jednotlivých profilů zprůměrovat a pro zprůměrované průběhy rozšířených nejistot  $U$  pozorujeme ve všech případech téměř lineární závislosti mezi nárůstem  $U$  a  $u_B$ . Na základě podrobné analýzy a vyhodnocení bylo doporučeno uvažovat alespoň s výslednou průměrnou hodnotou rozšířené nejistoty  $U$  z 6 vodních nádrží, v ideálním případě pak s maximální hodnotou této nejistoty.

Poté byla vytvořena nová knihovna k softwaru UNCE\_RESERVOIR. Tato knihovna počítá optimální zásobní objem nádrže pro zabezpečení menší než 100 % v podmínkách nejistot. Byla provedena analýza vstupních nejistot na nádržích Vír I a Vranov. Aktualizované vstupní přítoky vody do testovaných nádrží v obou případech způsobily vyšší poruchu v nedodávce vody. Jinými slovy, nádrže nemohly zaručit  $P_T \geq 99,5$  %. Z tohoto důvodu musely být nejprve stávající  $O_P$  sníženy. Poté byly pro nádrže vypočítány optimální zásobní objemy  $V_{Z_{optim}}$  včetně vstupních nejistot, které způsobily potřebu navýšit stávající  $V_Z$ . Byly doporučeny optimální hodnoty  $V_Z$ , které by se vyrovnaly s aktualizovanou řadou přítoku vody do nádrže a s uvažováním vstupních nejistot. Vyvinutý simulačně-optimalizační model nádrže a použité metody prokázaly svoji funkčnost při řešení optimálního zásobního objemu nádrží v podmínkách vstupních nejistot.

Ke splnění dalšího cíle byl vyvinut nový software TRANSFORM\_WAVE pro transformaci povodňových vln modifikováním grafické Klemešovy metody. Software opět zavádí vstupní nejistoty metodou Monte Carlo a umožňuje stanovit retenční objem nádrže v podmínkách nejistot vstupních dat. Vyvinutý software prokázal, že použité metody se dají bez problému aplikovat na transformaci povodňových vln. Testování a analýza softwaru byla provedena na vodní nádrži Vír I. Na základě dosažených výsledků a vyhodnocení bylo pro tuto nádrž taktéž doporučeno konkrétní navýšení stávajícího retenčního objemu nádrže, který by se

vypořádal s aktualizovanou povodňovou vlnou  $Q_{1.000}$  bez předpouštění včetně vstupní nejistoty vznikající při odvození povodňové vlny.

Zdrojový kód obou softwarů je napsán obecně a softwary se dají rychle využít k testování i jiných nádrží nebo nádrží plánovaných. Navíc se oba tyto softwary dají využít v návaznosti na sobě. Potom jde celý problém víceúčelových nádrží v podmínkách nejistot pojmout komplexněji, což vede k naplnění posledního cíle, kdy bylo záměrem stanovit funkční objemy nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat. Pro tuto problematiku byla opět zvolena vodní nádrž Vír I. Analýza byla provedena tak, že se zvolilo několik vypočtených optimálních zásobních objemů nádrže, pro které byly spočteny transformace. Výsledkem je zjištění, jak navýšení zásobního objemu ovlivňuje transformaci aktualizované povodňové vlny v podmínkách nejistot. Byla vytvořena výsledná tabulka s možnostmi řešení zásobního a retenčního objemu v podmínkách nejistot včetně možných kulminací povodní a maximálních výšek vody v nádrži.

Nakonec je třeba konstatovat, že předložené analýzy byly provedeny pouze pro 2, resp. 1 nádrž, a tudíž výsledky v současné době nelze zobecnit. Je zde ale předpoklad, že pro jiné nádrže s odlišnými vstupními nejistotami budou výsledky  $V_Z$  a  $V_R$  taktéž ovlivněny. Je tedy jasné, že i další případové studie budou mít dopad na stávající funkční objemy se zavedením vstupních nejistot, což potvrzuje význam této problematiky. Existuje zde prostor pro budoucí přezkoumání manipulačních řádů nádrží a byla by vhodná také případná změna normy ČSN 75 2405, která by měla brát v úvahu nejistoty vstupních dat.

Finální rozhodnutí konkrétního nastavení funkčních objemů vody v nádrži bude ale vždy na vlastníkově, uživateli nebo investorovi, což vede k detailním analýzám vodních děl. Dále je možné vylepšit řešení např. zkapacitněním bezpečnostního přelivu a spodních výpustí, zároveň přesně modelovat rozliv kulminačního průtoku pod nádrží, podrobněji ověřit bezpečnostní výšku mezi maximální dosaženou hladinou a KMH, apod. Jak ale bylo zmíněno, oba softwary jsou napsány obecně a zároveň i doporučení jako změna bezpečnostního přelivu nebo spodních výpustí se dá velmi rychle a snadno do výpočtu zapracovat. Byl tedy vytvořen nástroj pro komplexní stanovení funkčních objemů nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat.

V budoucnu pravděpodobně nastane ještě větší problém, jak se vypořádat s hydrologickými extrémy u víceúčelových nádrží. Jinými slovy, jak zabezpečit odtok vody z nádrže dostatečně kapacitním zásobním objemem v podmínkách nejistot a zároveň jak zvládat a eliminovat extrémní povodně. Celá práce uvažovala s nejistotami vznikajícími pouze z měření. Přítoky i povodně určitě lze řešit i pomocí klimatických modelů a emisních scénářů. V této práci ale bylo záměrem podchytit konkrétně nejistoty měření, a to především neznalost velikosti nejistoty přítoků vody do nádrže (stanovení měsíčních průtoků nebo

povodňových vln), dále neznalost batygrafických křivek nádrže, ale i výparu a průsaku. Proto nakonec i přítoky vody do nádrže jsou v této práci generovány metodou Monte Carlo, aby byly všechny vstupy ucelené a jednotné. Na druhou stranu i do těchto softwarů se při nahrávání vstupních dat mohou opakovaně načíst různé scénáře přítoků vody do nádrže z klimatických modelů a pracovat tak s klimatickou změnou.

Během zpracování disertační práce se vyskytly další možnosti na budoucí rozšíření zkoumání této problematiky. Například pro nalezení vhodného poměru mezi prostory vody v nádrži by mohlo být využito multikriteriální optimalizace, která namísto jediného optimálního bodu dostává řadu řešení. Jelikož žádné z nedominovaných řešení v sadě není lepší než jakékoli jiné, jedno z nich je přijatelné. Volba jednoho řešení na úkor druhého ovšem vyžaduje znalosti konkrétních problémů a řadu faktorů souvisejících problémů. To by mohlo vést třeba k přiřazování jednotlivých důležitostí neboli navolit prioritu zásobního a retenčního objemu dané nádrže nebo například ekonomicky vyčíslit dopady sucha a povodně pro danou nádrž. Dále by bylo vhodné rozšířit software UNCE\_RESERVOIR o zbývající typ úlohy. Konkrétně o stanovení nejlepšího odtoku  $O_P$ , který bude funkcí zásobního objemu  $V_Z$  a zabezpečení  $P$ , tedy  $O_P = f(V_Z, P)$ . Obdobně by šel rozšířit i software TRANSFORM\_WAVE o další typy přelivů. Nakonec by bylo přínosné problematiku nejistot vodohospodářského řešení nádrže aplikovat i do soustavy nádrží.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Anand, A., Joshua, G., Sundaramoorthy, S., Samavedham, L. *Coordinating multiple model predictive controllers for multi-reservoir management*. In Proceedings of the 2011 IEEE International Conference On Networking, Sensing and Control, 2011.
- [2] Baldassarre, G. D., Montanari, A. *Uncertainty in river discharge observations: A quantitative analysis*. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(6), 913.
- [3] Bareš, D., Možný, M., Stalmacher, J. *Automatizace měření výparu v ČHMÚ*. In: Bioklimatológia a voda v krajine: Bioklimatologické pracovné dni 2006. Strečno, 2006, s. 9.
- [4] Beven, K.J. and Binley, A.M. 1992. *The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction*, Hydrological Processes, 6, p.279–298.
- [5] Beven, K. *Towards integrated environmental models of everywhere: uncertainty, data and modelling as a learning process*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 460–467, doi:10.5194/hess-11-460-2007, 2007.
- [6] Boano, F., Scibetta, M., Ridolfi, L., Giustolisi, O. *Water Distribution System Modeling and Optimization: A Case Study*, Procedia Engineering, Volume 119, 2015.
- [7] Böhm, J.; Radouch, V.; Hampacher, M. *Teorie chyb a vyrovnávací počet*. 2. uprav. vyd. Praha: Geodetický a kartografický podnik, 1990. ISBN 80-7011-056-2.
- [8] Borland Delphi Enterprise, Version 7.0. [software] 2002. Borland Software Corporation. Dostupné z: <https://www.borland.com>
- [9] Broža, V. *Metodické návody: k vodohospodářským řešením nádrží*. Praha: ČVUT v Praze, 1981, 114 s.
- [10] Campos, J.N.B., Souza Filho, F.A., and Lima, H.V.C., 2014. *Risks and uncertainties in reservoir yield in highly variable intermittent rivers: case of the Castanhão Reservoir in semi-arid Brazil*. Hydrological Sciences Journal, 59 (6), 1184–1195
- [11] Česká technická norma ČSN 75 2405 Vodohospodářské řešení vodních nádrží. Český normalizační institut, Hradec Králové, 2017.
- [12] Česká technická norma ČSN 75 1400 Hydrologické údaje povrchových vod. Český normalizační institut, Hradec Králové, 2014.
- [13] Česká technická norma ČSN 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních. Český normalizační institut, Hradec Králové, 2014.



- [14] Dantan, J.Y., Gayton, N., Qureshi, A.J., Lemaire, M., Etienne, A. *Tolerance Analysis Approach based on the Classification of Uncertainty (Aleatory/Epistemic)*, Procedia CIRP, Volume 10, 2013
- [15] Dokument: *Expression of the Uncertainty in Measurement in Calibration* (Metodika vyjadřování nejistot při kalibracích) EA 4/02, 1997 (v ČR ALE-R2, 1997).
- [16] Dokument: *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (Směrnice pro vyjadřování nejistoty při měření), BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1993.
- [17] Dokument: ISO GUM Suppl. 1 (DGUIDE 99998) *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)* — Supplement 1: Numerical methods for the propagation of distributions, ISO 2004.
- [18] Dokument: *Národní akční plán adaptace na změnu klimatu*. Ministerstvo životního prostředí [online]. 2015 [cit. 2019-09-11]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni\\_akcni\\_plan\\_zmena\\_klimatu/\\$FILE/OEOK-NAP\\_cely\\_20170127.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/$FILE/OEOK-NAP_cely_20170127.pdf)
- [19] Dokument: *Příprava realizace opatření pro zmírnění negativních dopadů sucha a nedostatku vody*. Mezirezortní komise VODA-SUCHO [online]. 2015 [cit. 2019-09-11]. Dostupný z: [http://www.suchovkrajine.cz/sites/default/files/podklad/03\\_prip\\_rava\\_realizace\\_opatreni.pdf](http://www.suchovkrajine.cz/sites/default/files/podklad/03_prip_rava_realizace_opatreni.pdf)
- [20] Dokument: *Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR*. Ministerstvo životního prostředí [online]. 2015 [cit. 2019-09-11]. Dostupný z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena\\_klimatu\\_adaptacni\\_strategie/\\$FILE/OEOK-Adaptacni\\_strategie-20151029.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie/$FILE/OEOK-Adaptacni_strategie-20151029.pdf)
- [21] Dokument: *Koncepce na ochranu před následky sucha pro území České republiky*. Ministerstvo zemědělství, Ministerstvo životního prostředí, Mezirezortní komise VODA-SUCHO a VÚV TGM v. v. i. [online]. 2017 [cit. 2019-09-11]. Dostupné z: [http://eagri.cz/public/web/file/545860/Koncepce\\_ochrany\\_pred\\_nasledky\\_sucha\\_pro\\_uzemi\\_CR.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/545860/Koncepce_ochrany_pred_nasledky_sucha_pro_uzemi_CR.pdf)
- [22] Dokument: *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G)* [online], Zeměměřický úřad ČÚZK, 2016. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA\\_ZPRAVA\\_DMR\\_5G.pdf](https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf)
- [23] Dokument: TPM 0051–93 *Stanovení nejistot při měřeních, podnikové normy ÚNMZ – TPM*, Český metrologický institut, 1993.
- [24] Dokument: WECC doc. 19–1990: Western European Calibration Cooperation, 1990.

- [25] Duchan, D.; Říha, J. *Considering Uncertainties in Design of Stormwater Infiltration Facility*. In 14th International Symposium Water Management and Hydraulic Engineering 2015 (WMHE). WATER MANAGEMENT AND HYDRAULIC ENGINEERING. Brno, CZ: Litera Brno, 2015. s. 356-378. ISBN: 978-80-214-5230- 5. ISSN: 2410-5910.
- [26] ESRI® ArcMap™ 10.0 Geografické informační systémy GIS, 2019, [online]. Dostupné z: <https://www.esri.com>
- [27] Gholam H. Akbari, Alireza H. Nezhad, Reza Barati, *Developing a model for analysis of uncertainties in prediction of floods*, Journal of Advanced Research, Volume 3, Issue 1, 2012.
- [28] Hanel, m.; Kašpárek, L.; Mrkvičková, M. a kol.: *Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i. Praha, 2011. ISBN 978-80-87402-22-1
- [29] Hashimoto, T., Stedinger, J. R., Loucks, D. P. *Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation*, Water Resources Research, Vol 18, NO 1, pages 14-20, February 1982.
- [30] Chen, J.; Zhong, P.-A.; Wang, M.-L.; Zhu, F.-L.; Wan, X.-Y.; Zhang, Y. *A risk-based model for real-time flood control operation of a cascade reservoir system under emergency conditions*. Water, 10, 167, 2018.
- [31] International Standard IEC – 60770 *Transmitters for use in industrial-process control systems*. International Electrotechnical Commission (IEC), Switzerland, 2010.
- [32] Jandora, J.; Šulc, J. *Hydraulika (MODUL 01)*. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2006. 178 s.
- [33] Kapelan Z., Savić D., Mahmoud H. *A Response Methodology for Reducing Impacts of Failure Events in Water Distribution Networks*, Procedia Engineering, volume 186, 2017, pages 218-227.
- [34] Kašpárek, L. *Odhad objemu nádrží potřebného pro kompenzaci poklesu odtoku vlivem klimatické změny*. VÚV Praha, 2005, Praha.
- [35] Kiureghian A., Ditlevsen O. *Aleatory or epistemic? Does it matter?*, Structural Safety, Volume 31, Issue 2, 2009.
- [36] Klemeš, V. *A simplified solution of the flood-routing problem*. Vodohospod. Čas. 8(4), 1960. 317-326.
- [37] Klemeš, V. *Reliability estimates for a storage reservoir with seasonal input*. J. Hydrol. 7, 198-216, 1967.

- [38] Knight, F. H. *Risk, Uncertainty, and Profit*. Boston, Hart, Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Company, Boston 1921.
- [39] Knozová, G.; Rožnovský, J.; Kohut, M. *Srovnání časových řad výparu naměřeného výparoměrem GGI-3000 a vypočítaného podle metodiky FAO*. In: Bioklimatologie současnosti a budoucnosti. Křtiny, 2005, s. 8.
- [40] Kohut, M.; Rožnovský, J.; Knozová, G. *Měření výparu z vodní hladiny výparoměrem GGI-3000 v České republice*. 1. vyd. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2013. ISBN 978-80-87577-16-5
- [41] Kritskiy, S. N. & Menkel, M. F. *Water Management Computations* (in Russian). 1952, GIMIZ, Leningrad.
- [42] Kuria, F. W. and Vogel, R. M. *A Global Reservoir Water Supply Yield Model With Uncertainty*, Environmental Research Letters, 9 095006 doi:10.1088/1748-9326/9/9/095006, 2014.
- [43] Kulasová B., Šercl P., Boháč M. *Metodická příručka pro výběr a aplikaci vhodné metody k odvození hydrologických podkladů za účelem posouzení bezpečnosti vodních děl*. Praha, Český Hydrometeorologický ústav, 2004
- [44] LaBaugh J. W., Winter T. C. (1984), The impact of uncertainties in hydrologic measurement on phosphorus budgets and empirical models for two Colorado reservoirs, *Limnology and Oceanography*, 2, doi: 10.4319/lo.1984.29.2.0322.
- [45] Li B, Liang Z, Zhang J, Chen X, Jiang X, Wang J, Hu Y, *Risk analysis of reservoir flood routing calculation based on inflow forecast uncertainty*. Water 2016, 8:486.
- [46] Maiolo, M., Mendicino, G., Senatore, A., Pantusa, D. *Optimization of drinking water distribution systems in relation to the effects of climate change*. Water, 9, 2017, 803
- [47] Manipulační řád pro vodní dílo Brno na řece Svatce v km 56,187. Brno: Povodí Moravy, s. p., 2008.
- [48] Manipulační řád pro vodní dílo Hubenov na Maršovském potoce v km 0,620. Brno: Povodí Moravy, s. p., 2009.
- [49] Manipulační řád pro vodní dílo Karolínka na toku Stanovnice v km 0,750. Brno: Povodí Moravy, s. p., 2014.
- [50] Manipulační řád pro vodní dílo Mostiště na Oslavě v km 65,948. Brno: Povodí Moravy, s. p., 2013.
- [51] Manipulační řád pro vodní dílo Vír na řece Svatce v km 114,900. Brno: Povodí Moravy, s. p., 2011.

- [52] Manipulační řád pro vodní dílo Vranov na řece Dyje v km 175,405. Brno: Povodí Moravy, s. p., 2011.
- [53] Marton, D. *Vliv nejistot průtokových řad průměrných měsíčních průtoků na vypočtené hodnoty zásobního objemu nádrže*. Disertační práce, Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2012, 104 s.
- [54] Marton, D. *Nejistoty zatěžující vodohospodářské řešení zásobního objemu údolní nádrže (Uncertainty impact on water management analysis of open water reservoir storage capacity)*. Zkrácená verze habilitační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2018. 34 stran. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. Habilitační a inaugurační spisy, sv. 618.
- [55] Marton, D.; Starý, M.; Menšík, P. *The Influence of Uncertainties in the Calculation of Mean Monthly Discharges On Reservoir Storage*, Journal of Hydrology and Hydromechanics. November 2011, Volume 59, Issue 4, Pages 228–237, ISSN (Print) 0042-790X, DOI: 10.2478/v10098-011-0019-3.
- [56] Marton, D.; Starý, M.; Menšík, P. *Analysis of the influence of input data uncertainties on determining the reliability of reservoir storage capacity*. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2015a, roč. 63, č. 4, s. 287-294. ISSN: 0042- 790X
- [57] Marton, D.; Starý, M.; Menšík, P.; Paseka, S. *Hydrological Reliability Assessment of Water Management Solution of Reservoir Storage Capacity in Conditions of Uncertainty*, příspěvek na konferenci Drought: Research and Science-Policy Interfacing, ISBN 978-1-138-02779-4, CRC Press Taylor & Francis Group, Leiden, Netherlands, 2015b.
- [58] Marton, D.; Starý, M.; Paseka, S.; Menšík, P. Určení hydrologické spolehlivosti vodohospodářského řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách nejistotami zatížených vstupních dat. In Vodohospodářská konference Vodní nádrže 2015. Brno: Povodí Moravy, s.p., Dřevařská 11, 602 00 Brno, 2015c. s. 5-8. ISBN: 978-80-260-8726- 7.
- [59] Marton, D., Starý, M. a Menšík, P. UNCERESERVOIR – Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže, 2015d. Dostupné z: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>
- [60] Marton, D.; Starý, M.; Paseka, S.; Menšík, P. *Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách nejistotami zatížených vstupních dat*. In XXXV. Přehradní dny 2016 Sborník příspěvků - svazek 1. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016.
- [61] Marton, D.; Paseka, S. *Uncertainty Impact on Water Management Analysis of Open Water Reservoir*. Environments, 2017, roč. 4, č. 1.

- [62] Měřicí loď Povodí Moravy, s.p. *Povodí Moravy* [online]. Dřevařská 11, BRNO: Povodí Moravy, s.p., 2012 [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <http://vodninadrze.pmo.cz/cz/stranka/reference-vn-2012/>
- [63] Morris, G. L., Fan, J., 1998. *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*, New York, USA: McGraw-Hill.
- [64] Ngo, L. L., Madsen, H., Rosbjerg, D. *Simulation and optimisation modelling approach for operation of the Hoa Binh reservoir, Vietnam*. Journal of Hydrology, vol. 336, no. 3-4, 2007.
- [65] Open Watcom FORTRAN 77. Documentatiton: *User's Guide*. [online], 2019a [cit. 2019-07-10]. Dostupné z: <http://www.openwatcom.org>
- [66] Open Watcom FORTRAN 77. Download: *Installer for FORTRAN*. [online], 2019b [cit. 2019-07-10]. Dostupné z: <http://www.openwatcom.org>
- [67] Palenčár, R.; Vdoleček, F.; Halaj, M. *Nejistoty měření I: vyjadřování nejistot*. Automa, 7, 2001a, č. 7-8, s.50-54.
- [68] Palenčár, R.; Vdoleček, F.; Halaj, M. *Nejistoty měření II: nejistoty přímých měření*. Automa, 7, 2001b, č. 10, s.52-56.
- [69] PALSTAT s.r.o. *Vyjadřování nejistot měření při kalibracích*. PALSTAT CAQ systémy řízení jakosti. Vrchlabí, 2002.
- [70] Paris Agreement - Pařížská dohoda [online]. Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change, 2018. [cit. 2019-09-18]. Dostupné z MŽP: [https://www.mzp.cz/cz/parizska\\_dohoda](https://www.mzp.cz/cz/parizska_dohoda)
- [71] Paseka, S. *Stanovení nejistoty měření průměrného měsíčního průtoku na vybraném vodoměrném profilu v povodí řeky Svitavy*. Brno, 2014. 70 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [72] Paseka, S. *Analýza nejistot hydrologických a provozních parametrů na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže*. Brno, 2016. 85 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [73] Paseka, S.; Kapelan, Z.; Marton, D. *Multi-Objective Optimization of Resilient Design of the Multipurpose Reservoir in Conditions of Uncertain Climate Change*. Water 2018, 10, 1110.

- [74] Paseka, S.; Marton, D. TRANSFORM\_WAVE – Program pro transformace nejistých povodňových vln, 2020. Dostupné z: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>
- [75] Paseka, S.; Marton, D. *Analýza vlivu nejistot vstupních dat na vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže*. In Vodohospodářská konference Vodní nádrže 2015. Brno: Povodí Moravy, s.p., Dřevařská 11, 602 00 Brno, 2015. s. 149-152. ISBN: 978-80-260-8726-7.
- [76] Paseka, S.; Marton, D. *Optimal Assessment of Reservoir Active Storage Capacity under Uncertainty*. In Conference Proceedings Volume 19. International multidisciplinary geoconference SGEM. Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems. 51 Alexander Malinov Blvd., 12, Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2019. s. 427-434. ISBN: 978-619-7105-61-2. ISSN: 1314-2704.
- [77] Paseka, S.; Marton, D.; Menšík, P. *Uncertainties of reservoir storage capacity during low water period*. In SGEM Conference Proceedings. International multidisciplinary geoconference SGEM. Hydrology and Water Resources. 51 Alexander Malinov Blvd., 1712, Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2016. s. 789-796.
- [78] Počasí v srpnu 2019 bylo k přírodě šetrnější: Tiskové zprávy ČHMÚ [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav 2019 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/informace-pro-vas/tiskove-zpravy/2019>
- [79] Roach T, Kapelan Z, Ledbetter R. *Comparison of robust optimization and info-gap methods for water resource management under deep uncertainty*. Journal of Water Resources Planning and Management, volume 143, 2017, no. 9,
- [80] Sadílek, V.; Doležal, J.; Vořechovský, M. *Řešené úlohy z oblasti spolehlivosti stavebních konstrukcí*. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2010. 79 s.
- [81] Shrestha, R. R, Simonovic, S. P. Fuzzy set theory based methodology for the analysis of measurement uncertainty in river discharge and stage. Canadian Journal of Civil Engineering 37(3), 2010, 429–439.
- [82] Starý, M. *HYDROG*. Software pro simulaci, predikci a operativní řízení odtoku vody z povodí, Brno, 1991-2007.
- [83] Starý, M. *Hydrologie (MODUL 01)*. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2005a, 213 s.
- [84] Starý, M. *Hydrologie (MODUL 03 Návody do cvičení)*. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2005b, 113 s.



- [85] Starý, M. *Nádrže a vodohospodářské soustavy* (MODUL 01). Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2006a, 120 s.
- [86] Starý, M. *Nádrže a vodohospodářské soustavy* (MODUL 02). Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2006b, 117 s.
- [87] Starý, M. Zpráva o výsledcích řešení při spolupráci na normalizačním rozborovém úkolu HDP VH 83/6 RÚ, VUT FAST v Brně, Brno, 1984.
- [88] Systém měření hloubek a sedimentů ve vodních tocích a nádržích, firma Vars, Caperea [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: [http://www.vars.cz/file/2820/CAPEREA\\_CZ.pdf](http://www.vars.cz/file/2820/CAPEREA_CZ.pdf)
- [89] TNV 75 0910 *Dovolené průsaky uzávěrů vodních děl*. Praha: Hydroprojekt CZ, 2004, 8 s. Odvětvová technická norma vodního hospodářství.
- [90] Tomkins, K. M. *Uncertainty in streamflow rating curves: Methods, controls and consequences. Hydrological Processes*, 28(3), 2014, 464-481.
- [91] Trnka, M.; Vizina, A.; Hanel, M.; Balek, J.; Hlavinka, P. a kol. *Pozorované změny a výhled pro vodní bilanci a potřebu vody v zemědělské krajině České republiky*. Vodohospodářská konference Vodní nádrže 2017. Brno: Povodí Moravy, s.p., Dřevařská 11, 602 00 Brno, 2017. ISBN 978-80-905368-5-2
- [92] Trnka, M.; Žalud, Z.; Hlavinka, P. a kol.: *Průvodce změnou klimatu: 8. kapitola Očekávané dopady změn klimatu* [online]. [cit. 2020-02-17]. Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i. Dostupné z: <https://www.klimatickazmena.cz/cs/vse-o-klimaticke-zmene/pruvodce-zmenou-klimatu/>
- [93] Tůma, A.; Fína, D. *Příprava vodních nádrží Vlachovice a Skalička*. Vodohospodářská konference Vodní nádrže 2017. Brno: Povodí Moravy, s.p., Dřevařská 11, 602 00 Brno, 2017. ISBN 978-80-905368-5-2
- [94] Viskot, M. *Úloha vodních nádrží v suchých letech*. Vodohospodářská konference Vodní nádrže 2019. Brno: Povodí Moravy, s.p., Dřevařská 11, 602 00 Brno, 2019. ISBN 978-80-907141-3-7
- [95] *Vodní nádrže sehrály letos důležitou roli*: Tiskové zprávy PMO [online]. Brno: Povodí Moravy, s. p, 2018 [cit. 2019-09-18]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/media/tiskove-zpravy/vodni-nadrze-sehraly-letos-dulezitou-rolí/>
- [96] Výroční zpráva 2018 [online]. Brno: Brněnské vodárny a kanalizace, a. s., 2018 [cit. 2019-09-18]. Dostupné z: <http://www.bvk.cz/akcionarum/vyrocní-zpravy/>
- [97] Westerberg, I. K., McMillan, H. K. Uncertainty in hydrological signatures. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3951–3968, 2015

- [98] Westerberg, I. K., McMillan, H. K. Uncertainty in hydrological signatures for gauged and ungauged catchments. *Water Resources Research*, 52,(3), 2016.
- [99] Whitehead, P. Hornberger, G. a Black, R. *Effects of parameter uncertainty in a flow routing model / Les effets de l'incertitude des paramètres dans un modèle du calcul du cheminement*, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24:4, 445-464, 2009.
- [100] Winter, T. C. *UNCERTAINTIES IN ESTIMATING THE WATER BALANCE OF LAKES*. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 17: 82–115, 1981.
- [101] WMO Statement on the State of the Global Climate in 2017. *World Meteorological Organization*, 2018 [online]. Geneva 2, Switzerland: Chairperson, Publications Board, [cit. 2019-09-10]. ISBN 978-92-63-11212-5. Dostupné z: [https://library.wmo.int/opac/doc\\_num.php?explnum\\_id=4453](https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=4453)
- [102] WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018. *World Meteorological Organization*, 2019 [online]. Geneva 2, Switzerland: Chairperson, Publications Board, [cit. 2019-09-10]. ISBN 978-92-63-11233-0. Dostupné z: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=5789](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5789)
- [103] WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019. *World Meteorological Organization*, 2020 [online]. Geneva 2, Switzerland: Chair, Publications Board, [cit. 2020-06-05]. ISBN 978-92-62-11248-5. Dostupné z: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10211](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10211)
- [104] Zadání Technicko-ekonomické studie variant Morava, Krupa – VD Hanušovice. Povodí Moravy, s.p. Smlouva o dílo [online]. 2015 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: [https://zakazky.eagri.cz/document\\_31234/586757eff8fed432f-smlouva-o-dilo-pdf](https://zakazky.eagri.cz/document_31234/586757eff8fed432f-smlouva-o-dilo-pdf)
- [105] Zahradníček, P., Trnka, M., Brázdil, R., Možný a kol. The extreme drought episode of August 2011–May 2012 in the Czech Republic. *International Journal of Climatology* 35(11), 2014.
- [106] Zitek, J. *Hydrologické poměry Československé socialistické republiky*. Díl II. Praha: Hydrometeorologický ústav, 1967.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$A$	realizace náhodné veličiny,
$a, b$	příslušné meze ohraničení hustoty pravděpodobnosti,
$\alpha$	redukční úhel,
$\alpha$	součinitele nalepšení [-],
$b$	šířka bezpečnostního přelivu [m],
$C_s(X)$	koeficient asymetrie,
$C_v(X)$	koeficient variace,
$D(X)$	disperze,
$E(X)$	exces neboli špičatost,
$F(h)$	čára zatopených ploch,
$F(X)$	distribuční křivka normálního normovaného rozdělení pravděpodobnosti,
$g$	tíhové zrychlení [ $\text{m s}^{-2}$ ],
$\sigma(X)$	směrodatná odchylka,
$\pm \sigma$	horní a dolní mez rozšířené nejistoty,
$H$	nadmořská výška vodní hladiny [m n. m.],
$H_{kulm}$	kulminace výšky vody v nádrži [m],
$h_p$	výška vody nad přelivem [m],
$h_{RO}$	výška retenčního objemu ovladatelného [m],
$h_{RN}$	výška retenčního prostoru neovladatelného [m],
$h_{Vz}$	výška zásobního objemu [m],
$h_v$	výška vody nad spodními výpustěmi [m],
$i$	je $i$ -tá hodnota měřené veličiny,
$i$	časový krok,
$K$	rozložení procentuálního podílu výparu [%],
$k$	koeficient rozšíření,
$k$	konečný časový krok,
$k$	počet všech měsíců vstupní časové řady,

$m$	součinitel přepadu [-],
$\min Q$	minimální průtok [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
$NX$	náhodné polohy bodů v 1D,
$NX, NY$	náhodné polohy bodů ve 2D,
$N(\mu(X), \sigma(X))$	normální rozdělení pravděpodobnosti vstupní hodnoty $X$ ,
$n$	je počet měření dané veličiny,
$n$	počet prvků náhodného výběru,
$O$	odtok vody z nádrže [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
$O_P$	nalepšený (požadovaný) odtok [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
$P$	zabezpečení [%],
$P_T$	zabezpečení podle trvání [%],
$p$	pravděpodobnost,
$p$ -kvantil	pravděpodobnostní kvantil,
$P(A)$	pravděpodobnost překročení [%],
$PO$	celkový počet opakování (generování),
$PP$	celkový počet prvků,
$Q$	průtok vody [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
$Q$	přítok vody do nádrže [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
$Q_a$	dlouhodobý průtok [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
$Qh$	tzv. $Qh$ bod nebo $Qh$ křivka,
$Q_{kulm}$	kulminace průtoků vody v nádrži [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
$O_{maxTP}$	maximální transformovaný odtok vody z nádrže [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
$Q_{maxPV}$	maximální hodnota povodňové vlny neboli kulminace povodně [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
$Q_N$	$N$ -letý průtok [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
$Q_{NE}$	neškodný odtok [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
$R^2$	hodnota spolehlivosti,
$S$	plocha výtokového otvoru (spodních výpustí) [ $\text{m}^2$ ],
$\Delta t$	časový krok (interval),
$U$	rozšířená standardní nejistota,

$u$	kombinovaná standardní nejistota,
$u_A$	standardní nejistota typu A,
$u_B$	celková standardní nejistota typu B,
$u_{BZj}$	standardní nejistoty typu B,
$U_{Vz}$	rozšířená nejistota zásobního objemu,
$\mu(X)$	střední hodnota,
$\mu$	součinitel odtoku [-],
$V$	objem vody [m <sup>3</sup> ],
$V_{celk}$	celkový objem nádrže [m <sup>3</sup> ],
$V(h)$	čára zatopených objemů,
$V_R$	retenční objem nádrže [m <sup>3</sup> ],
$V_{RO}$	retenční objem ovladatelný [m <sup>3</sup> ],
$V_{RN}$	retenční objem neovladatelný [m <sup>3</sup> ],
$V_{ST.N.}$	objem stálého nadržení [m <sup>3</sup> ],
$V_z$	zásobní objem nádrže [m <sup>3</sup> ],
$V_{Zoptim}$	optimální zásobní objem nádrže [m <sup>3</sup> ],
$V_{Z,max}$	prázdný zásobní objem nádrže [m <sup>3</sup> ],
$X$	parametr,
$\bar{x}$	výběrový průměr neboli střední hodnota,
$x_i$	$i$ -tý opakovaný výběr (opakované měření),
$X_i$	$i$ -tá vstupní hodnota z měření,
$X_0$	vstupní parametr,
$\chi$	konstanta, která plyne z rozdělení pravděpodobnosti,
$\zeta$	interval generátoru náhodných čísel,
$Z_{ti}$	klasifikace poruchy zásobního objemu nádrže,
$Z_1, Z_2, \dots, Z_n$	možné zdroje nejistot z jednotlivých zdrojů,
$\Delta z_{jmax}$	maximální odchylka $j$ -tého zdroje nejistoty,
$\Omega$	určený prostor,
$\pi$	kritérium.

## 11 SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Rozložení procentuálního podílu výparu <math>K</math> v průběhu kalendářního roku .....</i>	21
<i>Tab. 2 Potřebné informace vybraných vodních děl .....</i>	58
<i>Tab. 3 Výsledky zabezpečení <math>P_T</math> pro měnící se vstupní <math>O_P</math> na aktualizovaných datech VD Vír I.....</i>	69
<i>Tab. 4 Výsledky <math>O_P</math> pro měnící se vstupní <math>O_P</math> a <math>P_T \geq 99,5</math> % na aktualizovaných datech VD Vír I.....</i>	69
<i>Tab. 5 Výsledky zabezpečení <math>P_T</math> pro měnící se vstupní <math>O_P</math> na aktualizovaných datech VD Vranov .....</i>	70
<i>Tab. 6 Výsledky <math>O_P</math> pro měnící se vstupní <math>O_P</math> a <math>P_T \geq 99,5</math> % na aktualizovaných datech VD Vranov .....</i>	70
<i>Tab. 7 Výsledky analýzy optimálních zásobních objemů <math>V_Z</math> nádrže Vír I .....</i>	70
<i>Tab. 8 Výsledky analýzy optimálních zásobních objemů <math>V_Z</math> nádrže Vranov .....</i>	74
<i>Tab. 9 Výsledky středních hodnot a směrodatných odchylek kulminací průtoků [<math>m^3 s^{-1}</math>] testovaných povodní po transformaci.....</i>	94
<i>Tab. 10 Výsledky středních hodnot a směrodatných odchylek kulminací výšek vody v nádrži [<math>m</math>] testovaných povodní po transformaci.....</i>	95
<i>Tab. 11 Překročení KMH nádrže [%] během transformace povodňové vlny <math>Q_{10.000}</math> .....</i>	96
<i>Tab. 12 Vybrané optimální hodnoty <math>V_{Zoptim}</math> [<math>m^3</math>] a jejich odpovídající výška vody v nádrži včetně omezení retenčního prostoru ovladatelného .....</i>	98
<i>Tab. 13 Výsledné objemy vody v nádrži a jejich odpovídající výška vody v nádrži pro vybrané optimální hodnoty <math>V_{Zoptim}</math> [<math>m^3</math>] včetně velikostí kulminací transformovaných povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> .....</i>	106
<i>Tab. 14 Výsledný násobek standardní vstupní nejistoty <math>u_B</math> k výsledným rozšířeným nejistotám zásobních objemů <math>U_{Vz}</math> všech profilů .....</i>	109
<i>Tab. 15 Procentuální nárůsty rozptylů <math>\pm 2\sigma(V_{Zoptim})</math> nádrže Vír I a Vranov v závislosti na vstupních nejistotách <math>u_B</math>.....</i>	112
<i>Tab. 16 Transformační efekt nádrže Vír I [%] testovaných povodňových vln .....</i>	113
<i>Tab. 17 Výsledné objemy vody v nádrži a jejich odpovídající výška vody v nádrži pro vybrané optimální hodnoty <math>V_{Zoptim}</math> [<math>m^3</math>] včetně velikostí kulminací transformovaných povodňových vln .....</i>	115



## 12 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Rozdělení pravděpodobnosti a koeficienty <math>k</math> (Palenčár a kol., 2001b).....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2 Schéma obecného principu generování nejistot vstupních prvků metodou Monte Carlo pro 1D souřadnicový systém .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3 Schéma principu generování náhodných poloh bodů <math>(V,h)</math> křivky zatopených objemů pro 2D souřadnicový systém.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4 Schéma principu mřížkové metody a volby parametrů (Starý, 2006b) .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 5 Princip konstrukce transformace povodňové vlny Klemešovou metodou.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 6 Záložky uživatelského rozhraní UNCE_RESERVOIR .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 7 Dialogové okno pro načtení a vykreslení přítoků vody do nádrže.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 8 Dialogové okno pro načtení a vykreslení batygrafických křivek .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 9 Dialogové okno pro zavedení hodnot měsíčního výparu vody z vodní hladiny .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 10 Dialogové okno pro výpočet celkového průsaku tělesem hráze .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 11 Symbolické zavedení uvažovaných veličin zatížených nejistotami .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 12 Nabídka úloh pro výpočet programu UNCE_RESERVOIR.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 13 Ukázka dialogového okna výpočtu <math>V_Z = f(O_P, P_T)</math> pro <math>P_T = 100 \%</math>.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 14 Ukázka dialogového okna výpočtu <math>V_Z = f(O_P, P_T)</math> pro <math>P_T &lt; 100 \%</math>.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 15 Vývojový diagram výpočtu <math>V_Z = f(O_P, P_T)</math> pro <math>P_T = 100 \%</math>.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 16 Vývojový diagram výpočtu optimalizovaného <math>V_Z = f(O_P, P_T)</math> pro <math>P_T &lt; 100 \%</math>.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 17 Ukázka dialogového okna výsledky <math>V_Z = f(O_P, P_T)</math> pro <math>P_T = 100 \%</math>.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 18 Ukázka dialogového okna závislosti <math>O_P</math> na <math>V_Z</math> pro úlohu <math>V_Z = f(O_P, P_T)</math> pro <math>P_T = 100 \%</math>.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 19 Ukázka dialogového okna výsledky <math>V_Z = f(O_P, P_T)</math> pro <math>P_T &lt; 100 \%</math>.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 20 Záložky uživatelského rozhraní TRANSFORM_WAVE .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 21 Ukázka načtené a vykreslené povodňové vlny .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 22 Dialogové okno vstupních údajů spodních výpustí a bezpečnostního přelivu .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 23 Ukázka dialogového okna výpočtu transformace povodňové vlny .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 24 Vývojový diagram výpočtu transformace povodňové vlny.....</i>	<i>52</i>

<i>Obr. 25 Ukázka dialogového okna výsledky s vykreslenými průběhy transformovaných povodní .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 26 Ukázka dialogového okna výsledky s vykreslenými průběhy výšek vody v nádrži .</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 27 Volba zadávání v softwarech pro komplexní stanovení funkčních objemů nádrže</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 28 Vývojový diagram komplexního řešení funkčních objemů nádrže .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 29 Vybraná vodní díla ve správě Povodí Moravy, s.p. (mapy.cz).....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 30 Vybraná vodní díla – detail.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 31 Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení <math>\alpha</math> [%] a rozšířenými nejistotami (pro <math>k=2</math>) zásobního objemu <math>U [\pm \text{ %}]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \text{ %}]</math> v profilu VD Brno .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 32 Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení <math>\alpha</math> [%] a rozšířenými nejistotami (pro <math>k=2</math>) zásobního objemu <math>U [\pm \text{ %}]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \text{ %}]</math> v profilu VD Hubenov.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 33 Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení <math>\alpha</math> [%] a rozšířenými nejistotami (pro <math>k=2</math>) zásobního objemu <math>U [\pm \text{ %}]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \text{ %}]</math> v profilu VD Karolinka.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 34 Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení <math>\alpha</math> [%] a rozšířenými nejistotami (pro <math>k=2</math>) zásobního objemu <math>U [\pm \text{ %}]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \text{ %}]</math> v profilu VD Mostiště.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 35 Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení <math>\alpha</math> [%] a rozšířenými nejistotami (pro <math>k=2</math>) zásobního objemu <math>U [\pm \text{ %}]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \text{ %}]</math> v profilu VD Vír .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 36 Průběhy závislostí mezi součinitelem nalepšení <math>\alpha</math> [%] a rozšířenými nejistotami (pro <math>k=2</math>) zásobního objemu <math>U [\pm \text{ %}]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \text{ %}]</math> v profilu VD Vranov .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 37 Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu <math>U [\pm \text{ %}]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \text{ %}]</math> a různé součinitele nalepšení <math>\alpha</math> [%] v profilu VD Brno.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 38 Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu <math>U [\pm \text{ %}]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \text{ %}]</math> a různé součinitele nalepšení <math>\alpha</math> [%] v profilu VD Hubenov .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 39 Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu <math>U [\pm \text{ %}]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \text{ %}]</math> a různé součinitele nalepšení <math>\alpha</math> [%] v profilu VD Karolinka.....</i>	<i>63</i>

<i>Obr. 40 Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu <math>U [\pm \ %]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \ %]</math> a různé součinitele nalepšení <math>\alpha [\%]</math> v profilu VD Mostiště .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 41 Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu <math>U [\pm \ %]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \ %]</math> a různé součinitele nalepšení <math>\alpha [\%]</math> v profilu VD Vir I .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 42 Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu <math>U [\pm \ %]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \ %]</math> a různé součinitele nalepšení <math>\alpha [\%]</math> v profilu VD Vranov .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 43 Výsledky průměrných rozšířených nejistot zásobního objemu <math>U [\pm \ %]</math> jednotlivých profilů pro součinitele nalepšení <math>\alpha = 0,3</math> až <math>0,6 [\%]</math> a uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \ %]</math> .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 44 Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu <math>U [\pm \ %]</math> pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \ %]</math> a vybrané součinitele nalepšení <math>\alpha [\%]</math> všech vyhodnocovaných profilů včetně průměrné hodnoty.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 45 Průběhy plnění a prázdnění optimalizovaného zásobního objemu <math>V_Z</math> nádrže Vir I pro <math>u_B = \pm 1, \pm 2</math> a <math>\pm 3 \ %</math> .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 46 Průběhy plnění a prázdnění optimalizovaného zásobního objemu <math>V_Z</math> nádrže Vir I pro <math>u_B = \pm 5, \pm 7 \ %</math> a očekávané.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 47 Pravděpodobnosti překročení výsledných optimalizovaných zásobních objemů nádrže Vir I pro různé velikosti vstupních nejistot .....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 48 Průběhy plnění a prázdnění optimalizovaného zásobního objemu <math>V_Z</math> nádrže Vranov pro <math>u_B = \pm 1, \pm 2</math> a <math>\pm 3 \ %</math> .....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 49 Průběhy plnění a prázdnění optimalizovaného zásobního objemu <math>V_Z</math> nádrže Vranov pro <math>u_B = \pm 5, \pm 7 \ %</math> a očekávané.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 50 Pravděpodobnosti překročení výsledných optimalizovaných zásobních objemů nádrže Vranov pro různé velikosti vstupních nejistot.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 51 Výsledky deterministického řešení průběhu transformací a průběhu výšek vody v nádrži pro velikosti povodňových vln <math>Q_{100}, Q_{1.000}</math> a <math>Q_{10.000}</math> a pro 2 varianty řízení nádrže (A) a (B) .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 52 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{100}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \ %, \pm 10 \ %, \pm 15 \ %</math> při variantě řízení nádrže A....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 53 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{100}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \ %, \pm 10 \ %, \pm 15 \ %</math> při variantě řízení nádrže A....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 54 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{100}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \ %, \pm 10 \ %, \pm 15 \ %</math> při variantě řízení nádrže B....</i>	<i>84</i>

<i>Obr. 55 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{100}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \%</math>, <math>\pm 10 \%</math>, <math>\pm 15 \%</math> při variantě řízení nádrže B....</i>	85
<i>Obr. 56 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \%</math>, <math>\pm 10 \%</math>, <math>\pm 15 \%</math> při variantě řízení nádrže A....</i>	86
<i>Obr. 57 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \%</math>, <math>\pm 10 \%</math>, <math>\pm 15 \%</math> při variantě řízení nádrže A....</i>	87
<i>Obr. 58 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \%</math>, <math>\pm 10 \%</math>, <math>\pm 15 \%</math> při variantě řízení nádrže B....</i>	88
<i>Obr. 59 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \%</math>, <math>\pm 10 \%</math>, <math>\pm 15 \%</math> při variantě řízení nádrže B....</i>	89
<i>Obr. 60 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{10.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \%</math>, <math>\pm 10 \%</math>, <math>\pm 15 \%</math> při variantě řízení nádrže A....</i>	90
<i>Obr. 61 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{10.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \%</math>, <math>\pm 10 \%</math>, <math>\pm 15 \%</math> při variantě řízení nádrže A....</i>	91
<i>Obr. 62 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{10.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \%</math>, <math>\pm 10 \%</math>, <math>\pm 15 \%</math> při variantě řízení nádrže B....</i>	92
<i>Obr. 63 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{10.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 5 \%</math>, <math>\pm 10 \%</math>, <math>\pm 15 \%</math> při variantě řízení nádrže B....</i>	93
<i>Obr. 64 Vybrané optimální hodnoty <math>V_Z</math> z pravděpodobnosti překročení výsledných optimalizovaných zásobních objemů nádrže Vír I.....</i>	98
<i>Obr. 65 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro 75 % kvantil <math>V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	99
<i>Obr. 66 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro 75 % kvantil <math>V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	100
<i>Obr. 67 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro 80 % kvantil <math>V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	100
<i>Obr. 68 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro 80 % kvantil <math>V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	101

<i>Obr. 69 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro 85 % kvantil <math>V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	101
<i>Obr. 70 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro 85 % kvantil <math>V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	102
<i>Obr. 71 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro 90 % kvantil <math>V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	102
<i>Obr. 72 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro 90 % kvantil <math>V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	103
<i>Obr. 73 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro 95 % kvantil <math>V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	103
<i>Obr. 74 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro 95 % kvantil <math>V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	104
<i>Obr. 75 Výsledky průběhu transformací vygenerovaných 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro horní mez <math>+2\sigma V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	104
<i>Obr. 76 Výsledky průběhu výšek vody v nádrži po transformaci 300 povodňových vln <math>Q_{1.000}</math> zatížených vstupní nejistotou <math>u_B = \pm 10 \%</math> pro horní mez <math>+2\sigma V_{Zoptim}</math> při variantě řízení nádrže A.....</i>	105
<i>Obr. 77 Výsledky průměrných rozšířených nejistot zásobního objemu <math>U_{Vz} [\pm \%]</math> všech profilů pro uvažované vstupní nejistoty <math>u_B [\pm \%]</math> a vybrané součinitele nalepšení <math>\alpha [\%]</math> .....</i>	108
<i>Obr. 78 Sloupcový graf výsledných optimalizovaných zásobních objemů <math>\mu(V_{Zoptim})</math> nádrže Vír I pro <math>\pm 2 \sigma (V_Z)</math> a 95 % kvantilů testovaných vstupních nejistot <math>u_B</math>.....</i>	111
<i>Obr. 79 Sloupcový graf výsledných optimalizovaných zásobních objemů <math>\mu(V_{Zoptim})</math> nádrže Vranov pro <math>\pm 2 \sigma (V_Z)</math> a 95 % kvantilů testovaných vstupních nejistot <math>u_B</math> .....</i>	111
<i>Obr. 80 Pravděpodobnosti překročení výsledných kulminací výšek vody v nádrži Vír I během transformace nejisté povodňové vlny <math>Q_{10.000}</math> pro vybrané zásobní objemy .....</i>	114